

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých
soustavách dle ČSN EN 60909

Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC
Networks by EN 60909

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Kříž

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách dle
ČSN EN 60909
Calculation of Short Circuits Currents in Three-phase AC Networks by
EN 60909

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor zkratových proudů
2. Metodika výpočtu zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách dle ČSN EN 60909
3. Praktický výpočet zkratových proudů
4. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Trojánek, Z.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, Praha 1987.
2. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
3. Pauza, J., Krychtánek, Z.: Elektrické stanice. SNTL Praha, 1989.
4. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex, Ostrava, 2008.
5. Santarius P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB Ostrava, 1993.
6. Horák, K.: Výpočet elektrických sítí. SNTL Praha, 1980.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

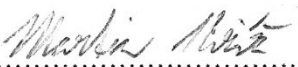



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta o autorství:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2014


.....
podpis studenta

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Dr. Ing. Zdeňku Medvecovi za jeho cenné rady při psaní této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá postupem při výpočtu zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách včetně praktické ukázky. Teoretická část zkoumá vznik a příčiny zkratu, druhy zkratů a použití souměrných složek při jejich výpočtu. Následující část určuje pravidla pro výpočet minimálních a maximálních zkratových proudů, přibližuje metodu výpočtu, definuje vztahy pro stanovení zkratových impedancí jednotlivých prvků a také zkratových proudů podle ČSN EN 60909. V praktickém příkladu jsou stanoveny počáteční souměrné rázové zkratové proudy elektrizační soustavy. Zkratové impedance jsou počítány ve skutečných hodnotách.

Klíčová slova

zkrat, zkratový proud, zkratový výkon, zkratová impedance, trojfázový zkrat, souměrné složky, ČSN EN 60909

Abstract

The Bachelor thesis deals with the procedure of the calculation of short-circuit currents in three-phase AC systems including practical demonstration. The theoretical part explores the origin and causes of short-circuits, types of short circuits and use of symmetrical components in their calculation. The following section defines the rules for calculating minimal and maximal short-circuit currents, introduces the calculation method, defines relations for the determination of short-circuit impedance of devices and short-circuit currents according to EN 60909. In practical part, example of calculation of the initial symmetrical surge short-circuit current in the power system is shown. The short-circuit impedance is calculated in real values.

Key words

Short-circuit, short-circuit current, short-circuit power, short-circuit impedance, three-phase short-circuit, symmetrical components, EN 60909

Seznam použitých symbolů a zkratk:

A	(A)	Počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$
\underline{a}	(-)	Komplexní konstanta
c	(-)	Napět'ový součinitel
$cU_n/\sqrt{3}$	(V)	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
d	(m)	geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo od středu svazku
f	(Hz)	Kmitočet
I_b	(A)	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
I_k	(A)	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
I_k''	(A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)
I_{LR}	(A)	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru
I_r	(A)	Jmenovitý proud elektrického zařízení
I_{th}	(A)	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud
$i_{d.c.}$	(A)	Stejnoseměrná složka zkratového proudu
i_p	(A)	Nárazový zkratový proud
K	(-)	Korekční součinitel pro impedance
$L1, L2, L3$		Fázové vodiče
m	(-)	Činitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
n	(-)	Činitel pro tepelné účinky střídavé složky
P_{krT}	(W)	Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
P_{rM}	(W)	Jmenovitý činný výkon asynchronního motoru
q_n	(mm ²)	Jmenovitý průřez
R příp. r	(Ω)	Rezistance, absolutní příp. poměrná hodnota nebo také poloměr vodiče (m)
R_G	(Ω)	Rezistance synchronního stroje
R_{Gf}	(Ω)	Fiktivní rezistance synchronního stroje při výpočtu i_p
S_k''	(VA)	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon
S_r	(VA)	Jmenovitý zdánlivý výkon elektrického zařízení
t_{min}	(s)	Minimální doba vypnutí
t_r	(-)	Jmenovitý převod transformátoru
T_K	(s)	Doba trvání zkratového proudu
U_i	(V)	Souměrné složky vnitřního napětí synchronního stroje
U_m	(V)	Nejvyšší napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
U_n	(V)	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)
U_r	(V)	Jmenovité napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)
u_{kr}	(%)	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru
u_{kR}	(%)	Napětí nakrátko reaktoru omezujícího zkrat
u_{Rr}	(%)	Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru
u_{Xr}	(%)	Induktivní složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru
$U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(0)}$	(V)	Napětí sousledné, zpětné, netočivé složkové soustavy
vn		Vysoké napětí
vvn		Velmi vysoké napětí
X příp. x	(Ω)	Reaktance, absolutní příp. poměrná hodnota

X_d''	(Ω)	Rázová reaktance synchronního stroje (nasyčená hodnota), podélná
x_d''	(-)	Poměrná rázová reaktance synchronního stroje, podélná
Y	(S)	Admitance
Z příp. z	(Ω)	Impedance, absolutní příp. poměrná hodnota
Z_k	(Ω)	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
$Z_{(1)}$	(Ω)	Sousledná impedance zkratového obvodu
$Z_{(2)}$	(Ω)	Zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{(0)}$	(Ω)	Netočivá impedance zkratového obvodu
Z_Δ	(Ω)	Přídavná impedance
zvň		Zvláště vysoké napětí
η	(-)	Účinnost asynchronního motoru
κ	(-)	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
λ	(-)	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
μ	(-)	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
μ_0	(H.m ⁻¹)	Absolutní permeabilita vakua
ρ	(Ω .mm ² .m ⁻¹)	Rezistivita (měrný odpor)
φ	(°)	Fázový úhel

Dolní indexy:

(1)	Sousledná složka
(2)	Zpětná složka
(0)	Netočivá složka
A	V místě zkratu A
B	V místě zkratu B
d.c.	Stejnoseměrný proud
f	fiktivní, v kapitole 2. 3 fázové
k příp. k3	Trojfázový zkrat
k1	Jednofázový zkrat
k2	Dvoufázový zkrat
K2E příp. KE2E	Dvoufázový zemní zkrat
K	Impedance nebo reaktance vypočítané s impedančním korekčním činitelem
max	Maximum
min	Minimum
n	Jmenovitá hodnota
r	Jmenovitá hodnota zařízení
E	zem
F	Místo zkratu
G	Generátor
L	Vodič
LR	Zabrzděný rotor
M	Asynchronní motor nebo jejich skupina

N	Střední vodič trojfázové střídavé soustavy, uzel vinutí (při zapojení do hvězdy) generátoru nebo transformátoru
Q	Bod připojení nadřazené soustavy
R	Reaktor omezující zkratové proudy
S	Soustava
T	Transformátor
V	Vedení

Horní indexy:

“	Počáteční rázová (zkratová) hodnota
‘	Rezistance či reaktance na jednotku délky

Obsah:

1	Úvod	1
2	Teoretický rozbor zkratových jevů	2
2.1	Definice	2
2.2	Druhy zkratů	5
2.3	Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno	6
2.3.1	Trojfázový zkrat	8
2.3.2	Dvoufázový zkrat	9
2.3.3	Dvoufázový zkrat zemní	10
2.3.4	Jednofázový zkrat	11
2.3.5	Ekvivalence nesouměrných zkratů se souměrným zkratem	12
2.3.6	Shrnutí	13
3	Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909	14
3.1	Předpoklady výpočtu	14
3.2	Metoda výpočtu	15
3.2.1	Metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu	15
3.2.2	Použití souměrných složek	15
3.3	Zkratové impedance prvků elektrizační soustavy	17
3.3.1	Všeobecně	17
3.3.2	Síťový napáječ	17
3.3.3	Transformátor	18
3.3.3.1	Dvouvinutový transformátor	18
3.3.3.2	Trojvinutový transformátor	19
3.3.4	Venkovní a kabelová vedení	20
3.3.5	Reaktory omezující zkratový proud	21
3.3.6	Synchronní stroje	21
3.3.6.1	Synchronní generátory	21
3.3.6.2	Synchronní kompenzátor a motor	22
3.3.7	Asynchronní motor	22
3.4	Výpočet zkratových proudů	23
3.4.1	Všeobecně	23
3.4.2	Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	24
3.4.2.1	Trojfázový zkrat	24
3.4.2.2	Dvoufázový zkrat	24
3.4.2.3	Dvoufázový zemní zkrat	25
3.4.2.4	Jednofázový zkrat	25
3.4.3	Nárazový zkratový proud i_p	25
3.4.3.1	Trojfázový zkrat	25
3.4.3.2	Dvoufázový zkrat	26
3.4.3.3	Dvoufázový zemní zkrat	26

3.4.3.4	Jednofázový zkrat	26
3.4.4	Stejnoseměrná složka zkratového proudu	27
3.4.5	Souměrný vypínací zkratový proud	27
3.4.5.1	Vzdálený zkrat	27
3.4.5.2	Blízký zkrat	27
3.4.5.3	Nesouměrné zkraty	28
3.4.6	Ustálený zkratový proud	28
3.4.7	Ekvivalentní oteplovací proud	29
4	Příklad výpočtu zkratových proudů	30
4.1	Vstupní údaje	30
4.2	Stanovení reaktancí a rezistancí prvků elektrizační soustavy	31
4.2.1	Skutečné hodnoty	31
4.2.2	Přepočet parametrů na napěťovou hladinu zkratu A	34
4.2.3	Přepočet parametrů na napěťovou hladinu zkratu B	36
4.3	Stanovení zkratové impedance	39
4.3.1	Zkrat v místě A – sousledná složka zkratové impedance	39
4.3.2	Zkrat v místě A – nulová složka zkratové impedance	44
4.3.3	Zkrat v místě B – sousledná složka zkratové impedance	47
4.3.4	Zkrat v místě B – nulová složka zkratové impedance	50
4.4	Výpočet zkratových proudů	51
4.4.1	Zkrat v místě A	51
4.4.2	Zkrat v místě B	51
5	Závěr	52
	Seznam použité literatury	53

Seznam obrázků:

Obrázek 2-1 Elektricky vzdálený zkrat	3
Obrázek 2-2 Elektricky blízký zkrat	4
Obrázek 2-3 Trojfázový zkrat	8
Obrázek 2-4 Dvoufázový zkrat	9
Obrázek 2-5 Dvoufázový zkrat zemní.....	10
Obrázek 2-6 Jednofázový zkrat.....	11
Obrázek 3-1 Sousedná složka zkratové impedance	16
Obrázek 3-2 Zpětná složka zkratové impedance.....	16
Obrázek 3-3 Netočivá složka zkratové impedance	16
Obrázek 3-4 Součinitel κ jako funkce poměru R/X nebo X/R	26
Obrázek 4-1 Schéma elektrizační soustavy pro výpočet trojfázového, dvoufázového a jednofázového zkratového proudu v zadaných místech schématu	30
Obrázek 4-2 Náhradní schéma sousledné složky impedance při zkratu v místě A	39
Obrázek 4-3 Náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě A	40
Obrázek 4-4 Zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě A.....	41
Obrázek 4-5 Náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě A	42
Obrázek 4-6 Zjednodušené náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě A.....	43
Obrázek 4-7 Náhradní schéma nulové složky impedance při zkratu v místě A.....	44
Obrázek 4-8 Náhradní schéma reaktance nulové složky při zkratu v místě A.....	44
Obrázek 4-9 Zjednodušené náhradní schéma reaktance nulové složky při zkratu v místě A	45
Obrázek 4-10 Náhradní schéma rezistance nulové složky při zkratu v místě A	45
Obrázek 4-11 Zjednodušené náhradní schéma rezistance nulové složky při zkratu v místě A.....	46
Obrázek 4-12 Náhradní schéma sousledné složky impedance při zkratu v místě B	47
Obrázek 4-13 Náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B	47
Obrázek 4-14 Zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B.....	48
Obrázek 4-15 Dále zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B.	49
Obrázek 4-16 Náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě B.....	49
Obrázek 4-17 Zjednodušené náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě B	50

Seznam tabulek:

Tabulka 2-1 Pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů	6
Tabulka 2-2 Přehled potřebných souměrných složek impedancí pro výpočet jednotlivých druhů zkratu	13
Tabulka 3-1 Napěťový součinitel c	15
Tabulka 4-1 Vstupní hodnoty síťových napáječů.....	30
Tabulka 4-2 Vstupní hodnoty synchronních generátorů	30
Tabulka 4-3 Vstupní hodnoty transformátorů	31
Tabulka 4-4 Vstupní hodnoty venkovních a kabelových vedení	31
Tabulka 4-5 Vstupní hodnoty asynchronních motorů	31

1 Úvod

Zkrat patří k nejčastějším poruchám v elektrizační soustavě. Vzniká poruchovým spojením nakrátko dvou nebo tří fází a v soustavách s uzemněným uzlem také spojením nakrátko jedné nebo dvou fází se zemí, resp. středním vodičem. Při zkratu se zmenšuje celková impedance v obvodu mezi místem zkratu a napěťovými zdroji, v ideálním případě až k nule. Následkem toho se mnohonásobně zvětšují proudy ve větvích a dochází k poklesu napětí v uzlech, zvláště v místech blízkých zkratu. Běžnými příčinami zkratu bývají poruchy nebo zestárnutí izolace, přímý úder blesku, poruchy způsobené přepětím, anebo přímé poškození venkovního vedení nebo kabelu.

Účinky zkratových proudů jsou i přes jejich krátkodobé působení nebezpečné. Jedná se především o oteplení elektrických zařízení a mechanické namáhání elektrických strojů a přístrojů. Při zemních zkratech vznikají nežádoucí vlivy na zařízení uložená v zemi, jakožto i rušivé vlivy na telekomunikační vedení. Obzvláště závažným důsledkem působení zkratových proudů je případný hluboký pokles napětí a narušení stability paralelního chodu generátoru, což silně ovlivňuje celou elektrizační soustavu. Poklesy napětí ovlivňují také chod elektrických spotřebičů.

2 Teoretický rozbor zkratových jevů

2.1 Definice [2]

Podle normy ČSN EN 60909 platí následující definice:

Zkrat - Náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule.

Mezifázový zkrat - Náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodiči se spojením na zem nebo bez něj.

Zkrat mezi fází a zemí (jednofázový zkrat) - Náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi vodičem a zemí v soustavě s uzlem uzemněným přímo nebo přes malou impedanci.

Zkratový proud - Nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě.

Předpokládaný zkratový proud - Proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud - Efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu.

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' - Efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci.

Počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k'' - Pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$: Pak tedy $S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k''$.

Stojnosměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu - Střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule.

Nárazový zkratový proud i_p - Maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b - Efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení.

Ustálený zkratový proud I_k - Efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu.

Záběrový proud I_{LR} - Největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím U_{rM} při jmenovitém kmitočtu.

Ekvivalentní elektrický obvod - Model určený k popisu chování obvodu pomocí sítě ideálních prvků.

Jmenovité napětí sítě U_n - Sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky.

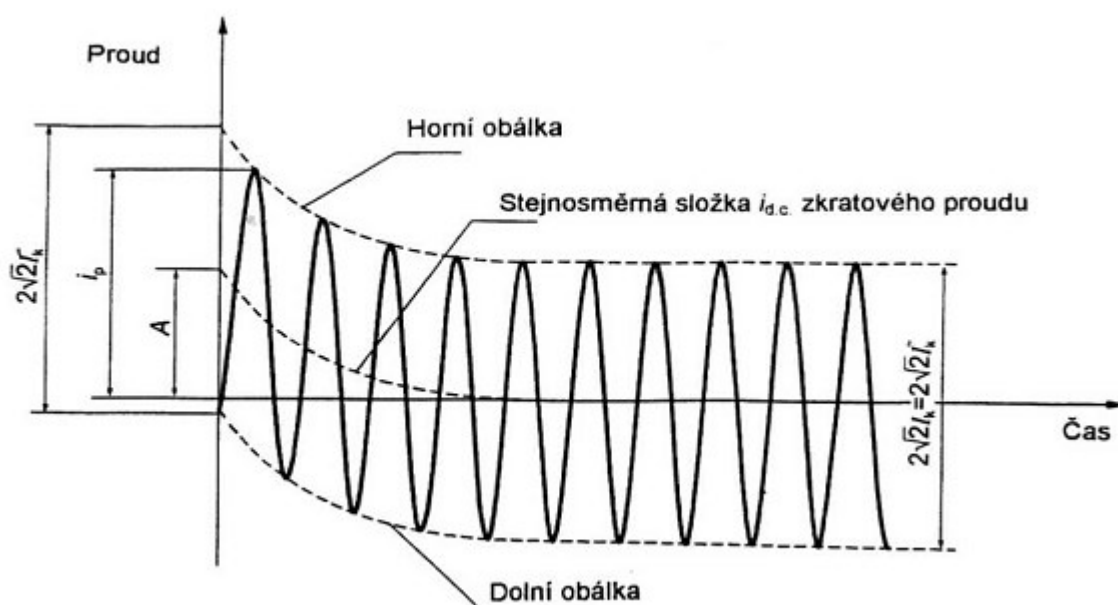
Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n/\sqrt{3}$ - Napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu; jedná se o jediné aktivní napětí sítě.

Napěťový součinitel c - Poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Rázové napětí synchronního stroje E'' - Efektivní hodnota souměrného vnitřního napětí synchronního stroje, které působí za rázovou reaktanci X_d'' v okamžiku zkratu.

Elektricky vzdálený zkrat - Zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní.

Obrázek 2-1 Elektricky vzdálený zkrat [2]

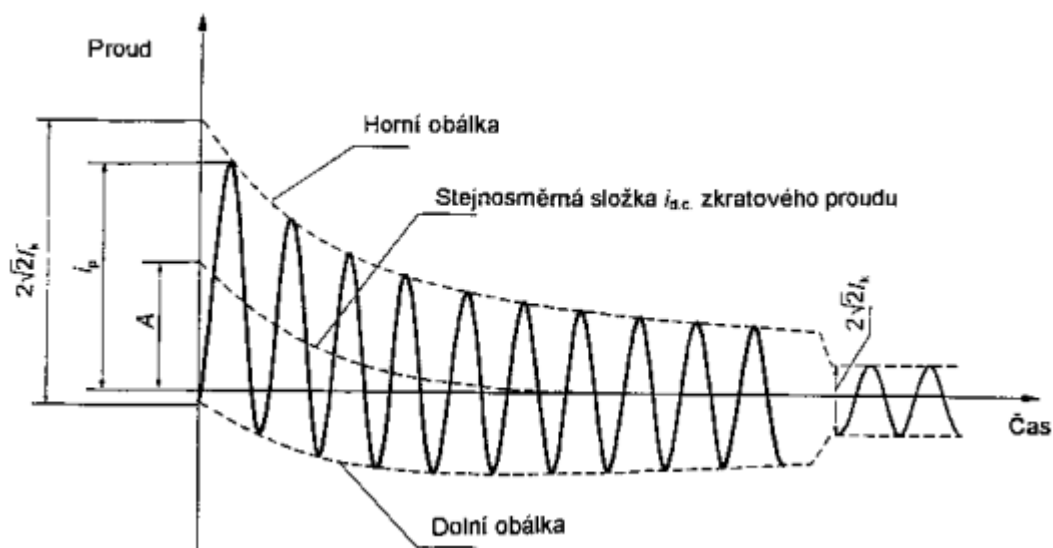


kde:

- I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;
- i_p nárazový zkratový proud;
- I_k ustálený zkratový proud;
- $i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu;
- A počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$.

Elektrický blízký zkrat - Zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů.

Obrázek 2-2 Elektrický blízký zkrat [2]



kde:

I_k'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud;

i_p nárazový zkratový proud;

I_k ustálený zkratový proud;

$i_{d.c.}$ stejnosměrná složka zkratového proudu;

A počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ trojfázové střídavé soustavy - Impedance sousledné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Zpětná zkratová impedance $\underline{Z}_{(2)}$ trojfázové střídavé soustavy - Impedance zpětné složkové soustavy viděná z místa zkratu.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)}$ trojfázové střídavé soustavy - Impedance netočivé složkové soustavy viděná z místa zkratu; zahrnuje trojnásobek impedance \underline{Z}_N mezi uzlem transformátoru a zemí.

Sousledná zkratová impedance $\underline{Z}_{(1)}$ elektrického zařízení - Poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné sousledné složkové soustavy napětí.

Zpětná zkratová impedance $Z_{(2)}$ elektrického zařízení - Poměr fázového napětí a zkratového proudu příslušné fáze elektrického zařízení při napájení ze souměrné zpětné složkové soustavy napětí.

Netočivá zkratová impedance $Z_{(0)}$ elektrického zařízení - Poměr napětí proti zemi a zkratového proudu jedné fáze elektrického zařízení při napájení ze střídavého napěťového zdroje, přičemž tři paralelní fázové vodiče jsou použity pro proud vycházející ze zdroje a čtvrtý vodič a/nebo zem tvoří společné zpětné vedení.

Rázová reaktance X_d'' synchronního stroje - Reaktance uplatňující se v okamžiku zkratu; pro výpočet zkratových proudů se používá nasycená hodnota X_d'' .

Minimální doba vypnutí t_{min} - Nejkratší čas mezi počátkem zkratového proudu a přerušením kontaktu prvního vypínacího pólu spínacího přístroje.

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} - Efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění.

2.2 Druhy zkratů

Zkraty v trojfázové soustavě se rozdělují na souměrné a nesouměrné. Souměrný zkrat postihuje všechny fáze najednou, jedná se tedy o zkrat trojfázový, případně trojfázový zemní, pokud se všechny tři fáze spojí se zemí. U tohoto zkratu nezáleží na zemnění uzlu. Všemi fázemi prochází stejný zkratový proud, přičemž tento proud zpravidla bývá větší než u ostatních druhů zkratů. Pravděpodobnost vzniku trojfázového zkratu na venkovním vedení je poměrně malá, jak ukazuje Tabulka 2-1. Naproti na kabelovém vedení se trojfázový zkrat vyskytuje nejčastěji, protože oblouk vzniklý při jakémkoli druhu zkratu snadno poškodí izolaci okolních vodičů.

Mezi nesouměrné zkraty patří zkrat dvoufázový, dvoufázový zemní a jednofázový. Dvoufázový zkrat vzniká spojením dvou fází v jednom místě, zbývající fáze zůstává nepostižena. V případě dvoufázového zkratu nezáleží na uzemnění uzlu. Dvoufázový zemní zkrat vzniká, když se spojení dvou fází současně spojí se zemí. Uzel musí být zemněný. Jednofázový zkrat je definován jako spojení jedné fáze se zemí v soustavě s uzemněným uzlem.

Tabulka 2-1 Pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů [3], upraveno autorem

druh zkratu	pravděpodobnost výskytu (%)		
	vn	110 kV	220 kV
trojfázový	5	0,6	0,9
dvoufázový	10	4,8	0,6
dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
jednofázový	65*	91	93,1
* v sítích vn, které se zpravidla provozují s uzlem izolovaným nebo nepřímo uzemněným, se tato porucha kvalitativně liší od zkratu a nazývá se zemní spojení.			

Jiné dělení zkratů spočívá ve způsobu spojení. Rozlišuje dokonalý zkrat, neboli kovové spojení – spoj má zanedbatelnou impedanci. Nedokonalý zkrat je takový, kde impedance spojení má vliv na velikost zkratového proudu. Jde například o spadenou větev na venkovní vedení. Obloukový zkrat vzniká při přiblížení fázových vodičů na přeskokovou vzdálenost, kdy dojde ke snížení izolační pevnosti a následnému hoření elektrického oblouku. Jelikož se proud a délka oblouku neustále mění, je velmi obtížné stanovit odpor oblouku.

2.3 Zkraty v trojfázové soustavě při chodu naprázdno [3]

Je dána jednoduchá souměrná trojfázová soustava se synchronním strojem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Impedance zkratového obvodu zahrnuje impedanci synchronního stroje a impedanci vnější části obvodu. Vyjádření fázorů napětí a proudu fází L1, L2, L3 v soustavě souměrných složek:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Kde indexy (0), (1), (2) označují netočivou, souslednou a zpětnou složkovou soustavu. Jednotkové fázory natočení jsou:

$$\begin{aligned}\underline{a} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2\pi}{3} \\ \underline{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{2\pi}{3} \\ 1 + \underline{a}^2 + \underline{a} &= 0\end{aligned}\quad (2.3)$$

Souměrné složky vnitřního napětí synchronního stroje jsou označeny \underline{U}_{i1} , \underline{U}_{i2} , \underline{U}_{i0} , souměrné složky napětí v místě zkratu $\underline{U}_{(1)}$, $\underline{U}_{(2)}$, $\underline{U}_{(0)}$ a složkové proudy $\underline{I}_{(1)}$, $\underline{I}_{(2)}$, $\underline{I}_{(0)}$. Poté platí:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i1} &= \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ \underline{U}_{i2} &= \underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{i0} &= \underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Synchronní stroj je vždy zdrojem pouze sousledné složky napětí. Proto platí při chodu naprázdno:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{i1} &= \underline{U}_i = \underline{U}_f \\ \underline{U}_{i2} &= 0 \\ \underline{U}_{i0} &= 0\end{aligned}\tag{2.5}$$

Kde \underline{U}_f je fázor napětí na svorkách synchronního stroje. Základní rovnice složkových soustav pak mají následující podobu:

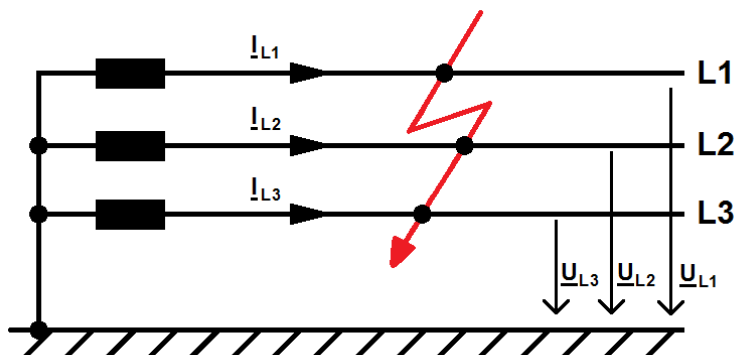
$$\begin{aligned}\underline{U}_i &= \underline{U}_f = \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(2)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(0)} + \underline{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{2.6}$$

Z rovnic (2.6) vychází dva závěry:

- Synchronní stroj je zdrojem napětí sousledné složkové soustavy.
- Napěťová nesymetrie v místě poruchy je původcem proudu zpětné a netočivé soustavy. V místě poruchy je nutno určit velikosti napětí a proudů jednotlivých složek složkové soustavy, proto se rovnice (2.6) doplňují dalšími třemi rovnicemi podle typu zkratu.

2.3.1 Trojfázový zkrat

Obrázek 2-3 Trojfázový zkrat



V místě poruchy platí pro tento typ zkratu tři rovnice:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = 0 \quad (2.7)$$

Z toho podle rovnice (2.1) vyplývá:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \\ \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \underline{U}_{(2)} = 0 \\ \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a} \underline{U}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Součtem rovnic lze získat $\underline{U}_{(0)} = 0$. Při uvažování této hodnoty u odečítání druhé rovnice od první pak platí:

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} = 0 \quad (2.9)$$

Po dosazení do základních rovnic (2.6) při zohlednění předpokladu chodu naprázdno ($\underline{U}_i = \underline{U}_f$) se zjišťuje:

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \underline{I}_{(2)} = 0; \underline{I}_{(0)} = 0 \quad (2.10)$$

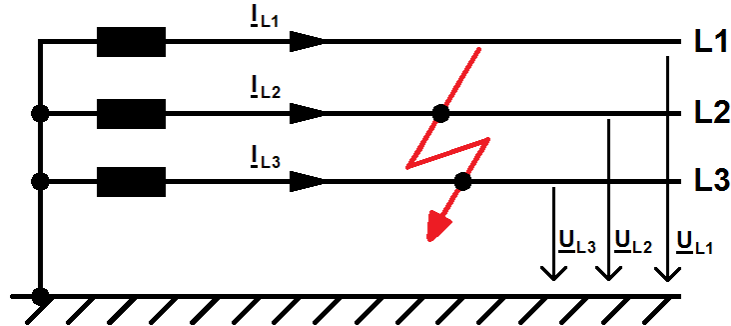
Po dosazení do rovnice (2.2) lze nalézt hledané zkratové proudy v jednotlivých fázích:

$$\underline{I}_{L1} = \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}}; \underline{I}_{L3} = \underline{a} \frac{\underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)}} \quad (2.11)$$

Při trojfázovém zkratu se uplatňuje pouze sousledná složková soustava.

2.3.2 Dvoufázový zkrat

Obrázek 2-4 Dvoufázový zkrat



V místě poruchy platí:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{L3} \Rightarrow \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = 0 \\ \underline{I}_{L1} &= 0; \underline{I}_{L3} = -\underline{I}_{L2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dosazením do rovnic (2.2) lze získat:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= 0 = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= -\underline{I}_{L2} = \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Sečtením rovnic lze dostat $\underline{I}_{(0)} = 0$. Z první rovnice pak plyne $\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)}$. Netočivá složka u tohoto druhu zkratu neexistuje, jelikož se musí uzavírat čtvrtým vodičem nebo zemí. Z rovnice (2.1) vychází také $\underline{U}_{(0)} = 0$ a dále:

$$\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} = 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{U}_{(2)} \Rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \quad (2.14)$$

Dosazení do základních rovnic (2.6):

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= -\underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\ 0 &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Odečtením lze obdržet:

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}) \underline{I}_{(1)} \quad (2.16)$$

A odtud:

$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (2.17)$$

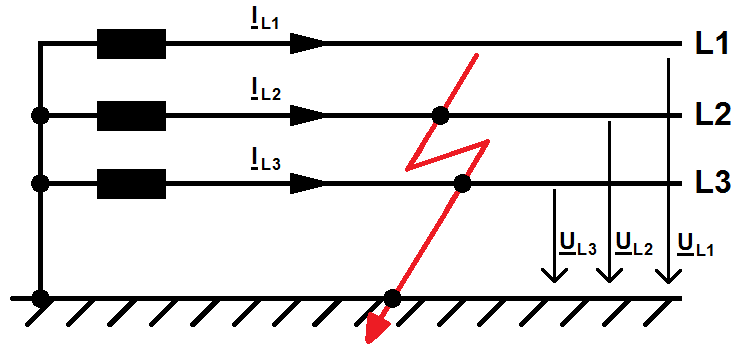
Zkratový proud např. ve fázi L3 o $\underline{U}_f = \underline{U}_f$:

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} = (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{I}_{(1)} = j \frac{\sqrt{3} \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (2.18)$$

Při dvoufázovém zkratu je třeba zjistit souslednou a zpětnou složkovou impedanci.

2.3.3 Dvoufázový zkrat zemní

Obrázek 2-5 Dvoufázový zkrat zemní



V místě zkratu platí:

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L3} = 0; \underline{I}_{L1} = 0 \quad (2.19)$$

Z rovnic (2.1) a (2.2) vyplývá:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = 0 \Rightarrow \underline{I}_{(0)} = -(\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) \\ \underline{U}_{L2} - \underline{U}_{L3} &= 0 = (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{U}_{(1)} + (\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{U}_{(2)} \Rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_{L2} = 0 &= \underline{U}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{U}_{(1)} + \underline{a} \underline{U}_{(2)} = (\underline{a}^2 + \underline{a}) \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} = -\underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \Rightarrow \underline{U}_{(1)} = \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Základní rovnice (2.6) pak jsou ve tvaru:

$$\begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)} \\ 0 &= \underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(2)} + \underline{U}_{(0)} \\ 0 &= -\underline{Z}_{(0)}(\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) + \underline{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

První rovnici je nutno vynásobit $\underline{Y}_{(1)} = \underline{Z}_{(1)}^{-1}$.

Druhou rovnici je nutno vynásobit $\underline{Y}_{(2)} = \underline{Z}_{(2)}^{-1}$.

Třetí rovnici je nutno vynásobit $\underline{Y}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)}^{-1}$.

Všechny tři rovnice se sečtou:

$$\underline{Y}_{(1)} \underline{U}_i = (\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}) \underline{U}_{(0)} \quad (2.22)$$

Odkud:

$$\underline{U}_{(0)} = \frac{\underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \underline{U}_i \quad (2.23)$$

Jednotlivé složkové proudy z rovnic (2.21) po dosazení za $\underline{U}_{(0)}$ jsou:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{(1)} &= \underline{Y}_{(1)} (\underline{U}_i - \underline{U}_{(0)}) = \underline{Y}_{(1)} \frac{\underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(2)} &= -\underline{Y}_{(2)} \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(2)} \underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \underline{U}_i \\ \underline{I}_{(0)} &= -\underline{Y}_{(0)} \underline{U}_{(0)} = -\frac{\underline{Y}_{(0)} \underline{Y}_{(1)}}{\underline{Y}_{(1)} + \underline{Y}_{(2)} + \underline{Y}_{(0)}} \underline{U}_i \end{aligned} \quad (2.24)$$

Nyní lze stanovit hledané proudy ve fázích L2, L3 užitím rovnice (2.2):

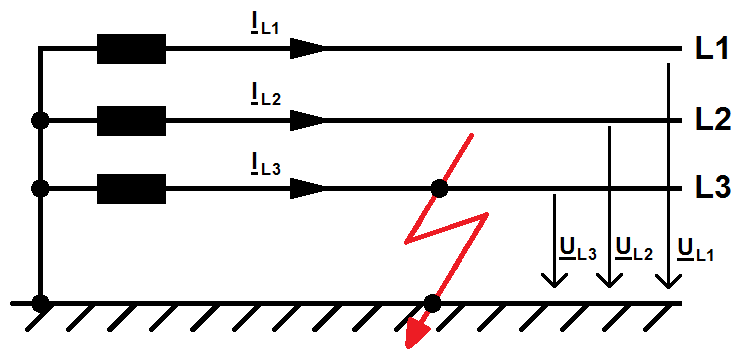
$$\begin{aligned} \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Proud tekoucí zemí je roven součtu proudů $\underline{I}_{L2}, \underline{I}_{L3}$:

$$\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 2\underline{I}_{(0)} + (\underline{a}^2 + \underline{a}) \underline{I}_{(1)} + (\underline{a} + \underline{a}^2) \underline{I}_{(2)} = 2\underline{I}_{(0)} - (\underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)}) = 3\underline{I}_{(0)} \quad (2.26)$$

2.3.4 Jednofázový zkrat

Obrázek 2-6 Jednofázový zkrat



V místě zkratu platí tři rovnice:

$$\underline{U}_{L3} = 0; \underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} = 0 \quad (2.27)$$

Z rovnic (2.1) a (2.2) vyplývá:

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = 0 \\
\underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} = 0 \\
\underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} = 0
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Odečtením rovnic proudů bude:

$$(\underline{a} - \underline{a}^2) \underline{I}_{(1)} + (\underline{a}^2 - \underline{a}) \underline{I}_{(2)} = 0 \tag{2.29}$$

Odsud vyplývá $\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$. Dosazením do rovnice pro \underline{I}_{L2} z (2.28) lze zjistit $\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)}$. Základní rovnice (2.6) pak jsou:

$$\begin{aligned}
\underline{U}_i &= \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(1)} \\
0 &= \underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\
0 &= \underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(1)} + \underline{U}_{(0)}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Jejich sečtením při zohlednění rovnice (2.28) se získává:

$$\underline{U}_i = (\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}) \underline{I}_{(1)} \tag{2.31}$$

A odtud:

$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \tag{2.32}$$

Zkratový proud ve fázi L3, pokud $\underline{U}_i = \underline{U}_f$, se vypočítá:

$$\underline{I}_{L3} = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = \frac{3 \underline{U}_f}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \tag{2.33}$$

Při jednofázovém zkratu je třeba určit všechny tři složkové impedance.

2.3.5 Ekvivalence nesouměrných zkratů se souměrným zkratem [1]

Trojfázový zkrat je souměrný, proto jsou složkové proudy $\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(2)} = 0$. Sousedný složkový proud je roven fázovému proudu.

$$\underline{I}_{(1)k} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)}} \tag{2.34}$$

Dvoufázový zkrat:

$$\underline{I}_{(1)k2} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \tag{2.35}$$

Dvoufázový zkrat zemní:

$$\underline{I}_{(1)k2E} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \frac{\underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}}{\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}}} \quad (2.36)$$

Jednofázový zkrat:

$$\underline{I}_{(1)k1} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (2.37)$$

Z porovnání jednotlivých vzorců pro výpočet sousledné složky zkratového proudu u různých typů zkratů vyplývá možnost použití jednoho vzorce pro všechny druhy zkratů.

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{U}_i}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{\Delta}} \quad (2.38)$$

Impedance \underline{Z}_{Δ} je přídavná impedance zaváděná do schématu sousledné soustavy v místě zkratu. Mění se podle druhu zkratu a je vyjádřena pouze impedancemi $\underline{Z}_{(2)}$ a $\underline{Z}_{(0)}$. Pro souměrný zkrat je impedance \underline{Z}_{Δ} nulová.

2.3.6 Shrnutí

Pro výpočet jednotlivých typů zkratů je nutno stanovit složky impedancí podle Tabulky 2-2.

Tabulka 2-2 Přehled potřebných souměrných složek impedancí pro výpočet jednotlivých druhů zkratu [3]

Zkrat	souměrné složky impedancí
trojfázový	sousledná
dvoufázový	sousledná, zpětná
dvoufázový zemní	sousledná, zpětná, netočivá
jednofázový	sousledná, zpětná, netočivá

3 Metodika výpočtu zkratových poměrů dle ČSN EN 60909 [2]

3.1 Předpoklady výpočtu

Výpočet zkratových proudů je zjednodušen následujícími předpoklady:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel K_T pro síťové transformátory.
- Odpor oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Pro účely určení zkratové odolnosti elektrického zařízení nebo jeho dimenzování se zjišťuje maximální zkratový proud, minimální zkratový proud pak určuje hodnoty pro nastavení ochran, volbu pojistek, či kontrolu rozběhu motorů.

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{max} podle Tabulky 3-1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu.
- Pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- Motory musí být zahrnuty.
- Uvažují se rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C.

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- Pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{min} podle Tabulky 3-1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Motory musí být zanedbány.
- Rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě; doporučuje se uvažovat maximální dovolenou provozní teplotu vodičů.

Tabulka 3-1 Napětový součinitel c [2]

Jmenovité napětí U_n	Napět'ový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů c_{max} ¹⁾	minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V	1,05 ³⁾ 1,1 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV		

¹⁾ $c_{max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno, potom $c_{max}U_n = U_m$ nebo $c_{min}U_n = 0,9 \cdot U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

3.2 Metoda výpočtu

3.2.1 Metoda ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu

Metoda použitá pro výpočet zavádí ekvivalentní napětový zdroj do místa zkratu. Ekvivalentní napětový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny ostatní zdroje napětí v soustavě (síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje) se nahrazují vnitřní impedancí (viz kapitola 3.3). Použitím metody odpadá nutnost výpočtů toků výkonů ve stavu před zkratem a potřeba znalosti provozních údajů (o buzení generátorů apod.).

3.2.2 Použití souměrných složek

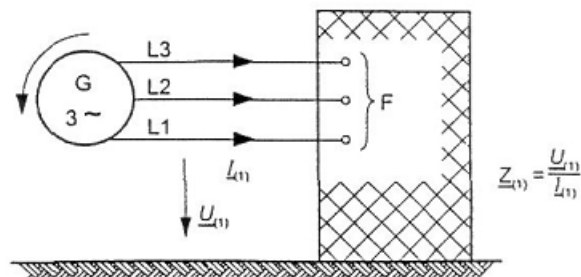
Výpočet hodnot proudů se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se symetrická struktura elektrického zařízení, například u transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu mají dostatečnou přesnost i v případě netransponovaných venkovních vedení. Použitím této metody lze zjistit proudy ve fázi superpozicí proudů tří souměrných složkových soustav, jak je uvedeno v rovnici (2.2).

Rozlišují se tři složkové soustavy:

Sousledná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$

Souslednou zkratovou impedanci v místě zkratu F lze určit podle obrázku 3-1, když se souměrná soustava napětí sousledné složky v odpovídajícím pořadí fází (kladném) přiloží do místa zkratu F. Všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

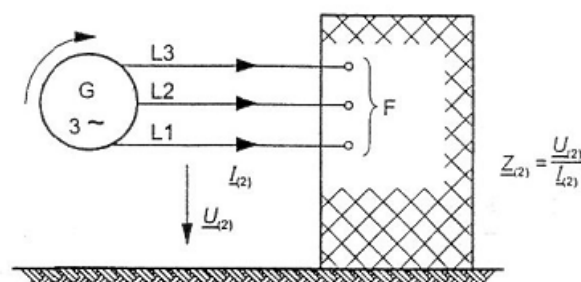
Obrázek 3-1 Sousedná složka zkratové impedance [2]



Zpětná složka zkratové impedance $Z_{(2)}$

Zpětnou zkratovou impedanci v místě zkratu F lze určit podle obrázku 3-2, když se souměrná soustava napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí fází (záporném) přiloží do místa zkratu F.

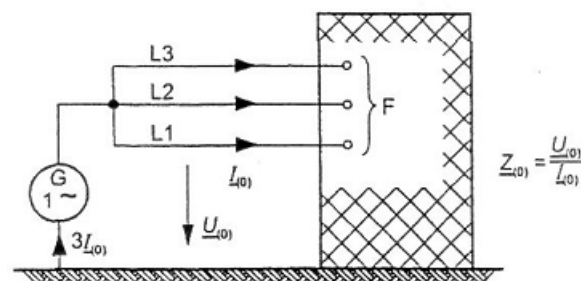
Obrázek 3-2 Zpětná složka zkratové impedance [2]



Netočivá složka zkratové impedance $Z_{(0)}$

Netočivou zkratovou impedanci v místě zkratu F lze určit podle obrázku 3-3, když se přiloží střídavé napětí mezi třemi zkratované fáze a společné zpětné vedení (zemnicí soustavu, nulový vodič, zemnicí vodič apod.).

Obrázek 3-3 Netočivá složka zkratové impedance [2]



Je nutné rozlišovat mezi zkratovými impedancemi v místě zkratu F a zkratovými impedancemi elektrického zařízení.

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou vzájemně odlišovat jen v případě točivých strojů. Při výpočtu elektricky vzdálených zkratů je obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

3.3 Zkratové impedance prvků elektrizační soustavy

3.3.1 Všeobecně

U zařízení typu síťového napáječe, transformátoru, reaktoru, kabelového a venkovního vedení a podobných platí, že sousledná a zpětná zkratová impedance jsou si rovny: $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$. V případě reaktoru je těmto impedancím rovna také impedance netočivé složky: $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(0)}$.

Netočivá zkratová impedance $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)}/\underline{I}_{(0)}$ je dána střídavým napětím, které se uvažuje mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (zemí, zemnicím či nulovým vodičem, zemnicím zařízením a podobně), a proudem netočivé složky, jehož trojnásobek protéká společným zpětným vedením.

Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit imedančními korekčními součiniteli, pokud se zkratové proudy počítají za použití metody ekvivalentního napětového zdroje, jak je uvedena v normě.

3.3.2 Síťový napáječ

Pokud je u sítě, ze které je napájen trojfázový zkrat, znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' v místě připojení napáječe Q, sousledná zkratová impedance sítě v místě Q je určena vztahem:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (3.1)$$

Pokud je znám poměr R_Q/X_Q , lze stanovit X_Q následovně:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (3.2)$$

V případě napájení zkratu transformátorem ze sítě vn, vvn nebo zvn, kde je znám počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' v místě připojení Q, lze ekvivalentní zkratovou impedanci Z_{Qt} vztahenou ke straně transformátoru s nižším napětím stanovit podle vztahu:

$$Z_{Qt} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (3.3)$$

kde:

U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v místě připojení napáječe Q;

I_{kQ}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě připojení napáječe Q;

c napětový součinitel pro napětí U_{nQ} (viz Tabulka 3-1);

t_r jmenovitý převod transformátoru při základní poloze přepínače odboček.

U napáječů se jmenovitým napětím nad 35 kV napájených z venkovních vedení je přípustné považovat impedanci Z_Q za reaktanci, tedy $Z_Q = 0 + jX_Q$. Jestliže v jiných případech není známa žádná hodnota rezistance R_Q , je možné dosadit $R_Q = 0,1 X_Q$, kde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

Počáteční souměrné rázové zkratové proudy na straně vyššího napětí transformátoru obvykle udává provozovatel přenosové či distribuční soustavy, případně se musí určit výpočtem podle normy.

3.3.3 Transformátor

3.3.3.1 Dvouvinut'ový transformátor

Sousledné zkratové impedance dvouvinut'ových transformátorů $Z_T = R_T + jX_T$ je možné určit následovně:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (3.4)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (3.5)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.6)$$

kde:

U_{rT} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

I_{rT} jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí;

S_{rT} jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru;

P_{krT} jmenovité ztráty nakrátko transformátoru;

u_{kr} jmenovité napětí nakrátko v procentech;

U_{Rr} činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Údaje potřebné k výpočtu a taktéž údaje o netočivé zkratové impedanci jsou uvedeny na štítku stroje, případně lze tato data získat od výrobce.

Poměr R_T/X_T obvykle roste s velikostí transformátoru. Při výpočtu velikosti zkratového proudu u velkých transformátorů je možné předpokládat, že impedanci tvoří pouze reaktance. Odpor je nutné uvažovat jen při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p nebo stejnosměrné složky $i_{d.c.}$.

U dvouvinut'ových transformátorů se musí navíc k impedancím zavést korekční součinitel K_T : $Z_{TK} = K_T \underline{Z}_T$, kde $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$.

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} \quad (3.7)$$

Kde x_T je poměrná reaktance transformátoru:

$$x_T = \frac{X_T}{\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}} \quad (3.8)$$

A c_{max} z Tabulky 3-1 odpovídá jmenovitému napětí sítě připojení ke straně nižšího napětí síťového transformátoru. Tento korekční součinitel neplatí pro blokové transformátory. Korekční součinitel musí být použit také u zpětných a netočivých impedancí transformátoru.

3.3.3.2 Trojvinutový transformátor

Sousledné složky zkratových impedancí \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C lze vypočítat pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{U_{RrAB}}{100\%} + j \frac{U_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (3.9a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{U_{RrAC}}{100\%} + j \frac{U_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (3.9b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{U_{RrBC}}{100\%} + j \frac{U_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (3.9c)$$

Kde u_{Xr} se vypočítá podle rovnice:

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (3.10)$$

A nakonec:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (3.11a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (3.11b)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (3.11c)$$

kde:

U_{rTA}	je	jmenovité napětí na straně A;
S_{rTAB}		jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami A a B;
S_{rTAC}		jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami A a C;
S_{rTBC}		jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru mezi stranami B a C;
u_{RrAB} , u_{XrAB}	jsou	jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a B;
u_{RrAC} , u_{XrAC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a C;
u_{RrBC} , u_{XrBC}		jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami B a C.

Netočivé impedance trojvinutových transformátorů lze získat od výrobce.

Tři impedanční korekční součinitele lze určit s pomocí poměrných hodnot reaktancí transformátorů (viz rovnice (3.8)):

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1+0,6 \cdot x_{TAB}} \quad (3.12a)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1+0,6 \cdot x_{TAC}} \quad (3.12b)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1+0,6 \cdot x_{TBC}} \quad (3.12c)$$

Z impedancí Z_{AB} , Z_{AC} , Z_{BC} podle rovnic (3.10) se určí korigované hodnoty $Z_{ABK} = K_{TAB} Z_{AB}$, $Z_{ACK} = K_{TAC} Z_{AC}$ a $Z_{BCK} = K_{TBC} Z_{BC}$. S těmito impedancemi se za použití postupu uvedeného v rovnici (3.11) stanoví korigované ekvivalentní impedance Z_{AK} , Z_{BK} a Z_{CK} .

Tři impedanční korekční činitele uvedené v rovnici (3.12) musí být použity také pro zpětnou a netočivou složku soustavy. Impedance mezi uzlem a zemí se určí bez korekčního součinitele.

3.3.4 Venkovní a kabelová vedení

Souslednou složku zkratové impedance $Z_L = R_L + jX_L$ lze stanovit pomocí parametrů vodiče, tedy průřezu nebo rozteče vodičů.

Činná rezistance na jednotku délky R_L' venkovních vedení při teplotě vodiče 20°C lze vypočítat z poměru rezistivity ρ a jmenovitého průřezu q_n :

$$R_L' = \frac{\rho}{q_n} \quad (3.13)$$

Pro rezistivitu lze použít následující hodnoty:

$$\text{Měď } \rho = \frac{1}{57} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{Hliník } \rho = \frac{1}{33} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Reaktanci na jednotku délky X_L' je možno vypočítat v případě, že je provedena transpozice vedení ze vzorce:

$$X_L' = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (3.14)$$

kde:

d je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči nebo od středu svazku,

$$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}};$$

r	poloměr jednoduchého vodiče, v případě svazkových vodičů se za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$, kde R je poloměr svazku;
n	počet vodičů ve svazku, pro jednoduchý vodič $n = 1$;
μ_0	permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Souslednou a netočivou složku zkratové impedance je možné určit měřením. Netočivé impedance lze také vypočítat s pomocí poměrů $R_{(0)L}/R_L$ a $X_{(0)L}/X_L$. Impedance $\underline{Z}_{(1)L}$ a $\underline{Z}_{(0)L}$ nn a vn kabelů jsou závislé na pracovních postupech a mohou se vzít z příruček nebo údajů od výrobce.

3.3.5 Reaktory omezující zkratový proud

Reaktory omezující zkratový proud se považují za součást zkratové impedance. Sousledná, zpětná i netočivá složka zkratové impedance má stejnou velikost za předpokladu geometrické souměrnosti. Rezistanci je možno zanedbat.

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}} \quad (3.15)$$

kde:

u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku;
 U_n je jmenovité napětí soustavy.

3.3.6 Synchronní stroje

3.3.6.1 Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů, například v průmyslových nebo nízkonapětových sítích, je nutno použít pro výpočet souslední složky zkratové impedance následující vztah:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad (3.16)$$

Kde K_G je korekční součinitel generátoru:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (3.17)$$

kde:

c_{max} je napěťový součinitel podle Tabulky 3-1;
 U_n jmenovité napětí soustavy;
 U_{rG} jmenovité napětí generátoru;
 \underline{Z}_{GK} korigovaná impedance generátoru;
 \underline{Z}_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě: $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$;
 φ_{rG} fázový úhel mezi \underline{I}_{rG} a $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$;
 x_d'' poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci $x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}}$,

$$\text{kde } Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}}.$$

Za fiktivní rezistance R_{Gf} lze s dostatečnou přesností dosadit následující hodnoty:

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA,}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1000 \text{ V.}$$

Hodnoty R_{Gf} je možné použít pro výpočet nárazového zkratového proudu. Tyto hodnoty nelze použít při výpočtu aperiodické složky $i_{d.c.}$ zkratového proudu, musí se užít hodnoty dané výrobcem. Pokud se mezi uzlem generátoru a zemí vyskytuje impedance, korekční součinitel impedance K_G se neužívá.

3.3.6.2 Synchronní kompenzátor a motor

Při výpočtu počátečního rázového zkratového proudu I_k'' , nárazového zkratového proudu i_p , souměrného zkratového vypínacího proudu I_b a ustáleného zkratového proudu I_k jsou synchronní kompenzátory modelovány identicky se synchronními generátory.

Synchronní motory s napětíovou regulací jsou modelovány jako synchronní generátory. Motory bez regulace vyžadují zvláštní postupy.

3.3.7 Asynchronní motor

Motory na vysokém napětí a na nízkém napětí přispívají k počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu I_k'' , k nárazovému zkratovému proudu i_p , k souměrnému zkratovému vypínacímu proudu I_b a v případě nesouměrného zkratu taktéž k ustálenému zkratovému proudu I_k .

Příspěvek vn motorů musí být zahrnut do výpočtu maximálního zkratového proudu. Příspěvek nn motorů se musí zahrnout do výpočtu ve vlastní spotřebě elektráren, případně v průmyslových rozvodech. Při výpočtu zkratových proudů lze zanedbat motory, které s ohledem na schéma zapojení (blokování) nebo funkci nejsou zároveň v provozu.

Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapětové soustavě ke zkratovému proudu I_k'' lze zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší než 5% počátečního zkratového proudu I_{kM}'' , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů.

$$\sum I_{rM} \leq 0,01 I_{kM}'' \quad (3.18)$$

kde:

$\sum I_{rM}$ je součet jmenovitých proudů motorů připojených přímo k síti s výskytem zkratu

I_{kM}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud bez vlivu nn motorů

Sousledná a zpětná složka impedance $\underline{Z}_M = R_M + jX_M$ se určí pomocí vztahu:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \cdot I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (3.19)$$

kde:

U_{rM} je jmenovité napětí motoru;

I_{rM} jmenovitý proud motoru;

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru $S_{rM} = P_{rM}/(\eta_{rM} \cos \varphi_{rM})$;

I_{LR}/I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Jestliže je znám poměr R_M/X_M , X_M se stanoví:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1+(R_M/X_M)^2}} \quad (3.20)$$

S dostatečnou přesností lze použít následující hodnoty:

$R_M/X_M = 0,10$, kde $X_M = 0,995 Z_M$	pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů ≥ 1 MW;
$R_M/X_M = 0,15$, kde $X_M = 0,989 Z_M$	pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů < 1 MW;
$R_M/X_M = 0,42$, kde $X_M = 0,922 Z_M$	pro skupiny motorů nn včetně připojovacích kabelů.

Netočivé impedance motorů v případě potřeby musí udat výrobce.

Motory připojené přes dvouvinutové transformátory k síti, v nichž dochází ke zkratu, lze zanedbat při výpočtu proudů zkratu v místě připojení napáječe Q, jestliže platí:

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left[\frac{c \cdot 100 \cdot \sum S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I_{kQ}''} - 0,3 \right]} \quad (3.21)$$

kde:

$\sum P_{rM}$ je součet jmenovitých činných výkonů zohledněných motorů vn a nn;

$\sum S_{rT}$ součet jmenovitých zdánlivých výkonů všech transformátorů, přes které jsou přímo napájeny motory;

I_{kQ}'' počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě připojení napáječe Q bez příspěvku motorů;

U_{nQ} jmenovité napětí soustavy v místě připojení napáječe Q.

3.4 Výpočet zkratových proudů

3.4.1 Všeobecně

V případě vzdáleného zkratu zkratový proud představuje součet následujících dvou složek:

- střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu
- stejnosměrné složky začínající v počáteční hodnotě A a klesající k nule

Průběh zkratového proudu při elektricky vzdáleném zkratu je znázorněn na Obrázku 2-1.

V případě elektricky blízkého zkratu, znázorněného na Obrázku 2-2, představuje zkratový proud součet následujících dvou složek:

- střídavé složky se zmenšující se amplitudou během zkratu
- stejnosměrné složky začínající v počáteční hodnotě A a klesající k nule

Typ zkratu, který vede k největšímu zkratovému proudu, určují hodnoty sousledné, zpětné a netočivé složky zkratové impedance soustavy. Pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu je možno uvažovat $Z_{(2)} = Z_{(1)}$.

3.4.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

V běžném případě je $Z_{(0)}$ větší než $Z_{(1)} = Z_{(2)}$, největší počáteční souměrný rázový zkratový proud se proto vyskytne u trojfázového zkratu. Pokud platí, že $Z_{(0)}$ je menší než $Z_{(1)}$, nejvyšší počáteční zkratový proud se vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

3.4.2.1 Trojfázový zkrat

V místě zkratu se zavádí ekvivalentní zdroj napětí $cU_n/\sqrt{3}$ se součinitelem c podle Tabulky 3-1.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (3.22)$$

Impedance prvků v soustavách, které jsou připojeny přes transformátory k síti, ve které se vyskytuje zkrat, musí být přepočítány pomocí druhé mocniny jmenovitého převodu transformátoru. Rezistance prvků R_k menší než $0,3 X_k$ se mohou zanedbat.

3.4.2.2 Dvoufázový zkrat

V případě dvoufázového zkratu se počáteční souměrný rázový zkratový proud počítá takto:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k'' \quad (3.23)$$

V počátečním období zkratu je zpětná a sousledná složka impedance přibližně rovna, proto jde zavést zjednodušení v rovnici (3.23). Při blízkém zkratu se může zkratová impedance $Z_{(2)}$ lišit od $Z_{(1)}$.

3.4.2.3 Dvoufázový zemní zkrat

Ve výpočtu počátečního souměrného rázového zkratového proudu je nutno rozlišit proudy I_{k2EL2}'' , I_{k2EL3}'' a I_{kE2E}'' .

$$I_{k2EL2}'' = -j cU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (3.24)$$

$$I_{k2EL3}'' = j cU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a^2 \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (3.25)$$

$$I_{kE2E}'' = - \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)} \cdot \underline{Z}_{(0)}} \quad (3.26)$$

Pro vzdálené zkraty přibližně platí $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$. Pokud je zároveň $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)}$, proud I_{kE2E}'' při mezifázovém zkratu se zemním spojením je největší ze všech počátečních souměrných rázových zkratových proudů.

$$I_{k2EL2}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.27)$$

$$I_{k2EL3}'' = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.28)$$

$$I_{kE2E}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \cdot \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.29)$$

3.4.2.4 Jednofázový zkrat

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu lze vypočítat podle:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (3.30)$$

Pro elektricky vzdálený zkrat se $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ potom lze vypočítat podle:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (3.31)$$

Pokud je $\underline{Z}_{(0)}$ menší než $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$, proud I_{k1}'' je větší než trojfázový zkratový proud I_k'' , avšak menší než I_{kE2E}'' .

3.4.3 Nárazový zkratový proud i_p

3.4.3.1 Trojfázový zkrat

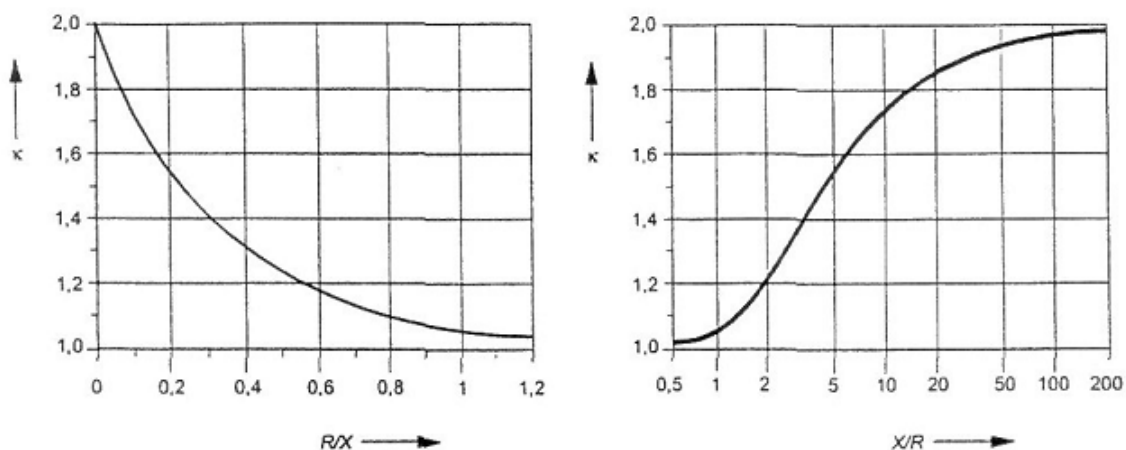
Pro trojfázové zkraty lze příspěvek nárazového zkratového proudu stanovit takto:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (3.32)$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se určí z Obrázku 3-1 nebo vypočítá pomocí vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3 R/X} \quad (3.33)$$

Obrázek 3-4 Součinitel κ jako funkce poměru R/X nebo X/R [2]



3.4.3.2 Dvoufázový zkrat

Nárazový zkratový proud při dvoufázovém zkratu se vypočítá takto:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (3.34)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejnou hodnotu κ jako u trojfázového zkratu. Pokud platí $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, dvoufázový nárazový zkratový proud i_{p2} je menší než trojfázový nárazový zkratový proud i_p :

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (3.35)$$

3.4.3.3 Dvoufázový zemní zkrat

Nárazový zkratový proud při dvoufázovém zemním zkratu se vypočítá takto:

$$i_{p2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}'' \quad (3.36)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejnou hodnotu κ jako u trojfázového zkratu. Počítat i_{p2E} je nutné pouze v případě, že $\underline{Z}_{(0)}$ je mnohem menší než $\underline{Z}_{(1)}$.

3.4.3.4 Jednofázový zkrat

Nárazový zkratový proud při jednofázovém zkratu se vypočítá takto:

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1} \quad (3.37)$$

Pro zjednodušení je dovoleno použít stejnou hodnotu κ jako u trojfázového zkratu.

3.4.4 Stejnoseměrná složka zkratového proudu

Maximální stejnosměrná složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu lze vypočítat s dostatečnou přesností pomocí vztahu:

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I''_k \cdot e^{-2\pi f t R/X} \quad (3.38)$$

kde:

I''_k je počáteční souměrný rázový zkratový proud;

f jmenovitý kmitočet;

t čas;

R/X poměr rezistance k reaktanci.

Použije se skutečná rezistance synchronního stroje R_G , nikoli fiktivní rezistence R_{Gf} .

3.4.5 Souměrný vypínací zkratový proud

Vypínací zkratový proud v místě zkratu sestává ze souměrného zkratového proudu I_b a stejnosměrné složky $i_{d.c.}$ v čase t_{min} , stanoveného podle rovnice (3.38).

3.4.5.1 Vzdálený zkrat

V případě vzdáleného zkratu jsou souměrné vypínací zkratové proudy shodné s počátečními souměrnými rázovými zkratovými proudy:

$$I_b = I''_k \quad (3.39)$$

$$I_{b2} = I''_{k2} \quad (3.40)$$

$$I_{b2E} = I''_{k2E} \quad (3.41)$$

$$I_{b1} = I''_{k1} \quad (3.42)$$

3.4.5.2 Blízký zkrat

Zmenšování souměrného zkratového vypínacího proudu s časem se zohledňuje pomocí součinitele μ :

$$I_b = \mu \cdot I''_k \quad (3.43)$$

Součinitel μ je závislý na minimální době vypnutí t_{min} a poměru I''_{kG}/I_{rG} , kde I_{rG} je jmenovitý proud generátoru. Pokud poměr I''_{kG}/I_{rG} není větší než 2, pro všechny doby vypnutí t_{min} platí $\mu = 1$.

Součinitel μ je pro různé doby vypnutí t_{min} definován takto:

$$\begin{aligned}
 \mu &= 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 I''_{kG}/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} = 0,02 \text{ s} \\
 \mu &= 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 I''_{kG}/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} = 0,05 \text{ s} \\
 \mu &= 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 I''_{kG}/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} = 0,10 \text{ s} \\
 \mu &= 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 I''_{kG}/I_{rG}} & \text{pro } t_{min} \geq 0,25 \text{ s}
 \end{aligned} \tag{3.44}$$

3.4.5.3 Nesouměrné zkraty

Při nesouměrných zkratech se neuvažuje pokles souměrné složky zkratového proudu [4]. Použijí se rovnice (3.40) až (3.42).

3.4.6 Ustálený zkratový proud

Výpočet ustáleného zkratového proudu I_k je méně přesný než výpočet počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' .

Při výpočtu maximálního ustáleného zkratového proudu se předpokládá maximální buzení synchronního generátoru:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \cdot I_{rG} \tag{3.45}$$

Při výpočtu minimálního ustáleného zkratového proudu se předpokládá konstantní buzení nezatiženého synchronního generátoru:

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \cdot I_{rG} \tag{3.46}$$

Uvažuje se c_{min} podle tabulky 3-1.

Určení λ_{max} a λ_{min} je blíže popsáno v normě ČSN EN 60909.

Při nesouměrných zkratech se neuvažuje pokles souměrné složky zkratového proudu [4], proto lze použít rovnice:

$$I_k = I_k'' \tag{3.47}$$

$$I_{k2} = I_{k2}'' \tag{3.48}$$

$$I_{k2E} = I_{k2E}'' \tag{3.49}$$

$$I_{k1} = I_{k1}'' \tag{3.50}$$

3.4.7 Ekvivalentní oteplovací proud

Energie vytvářená v odporovém prvku soustavy při průchodu zkratového proudu je dána Jouleovým integrálem $\int i^2 dt$. Tuto energii lze vypočítat použitím součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu:

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (3.51)$$

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je dán vztahem:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (3.52)$$

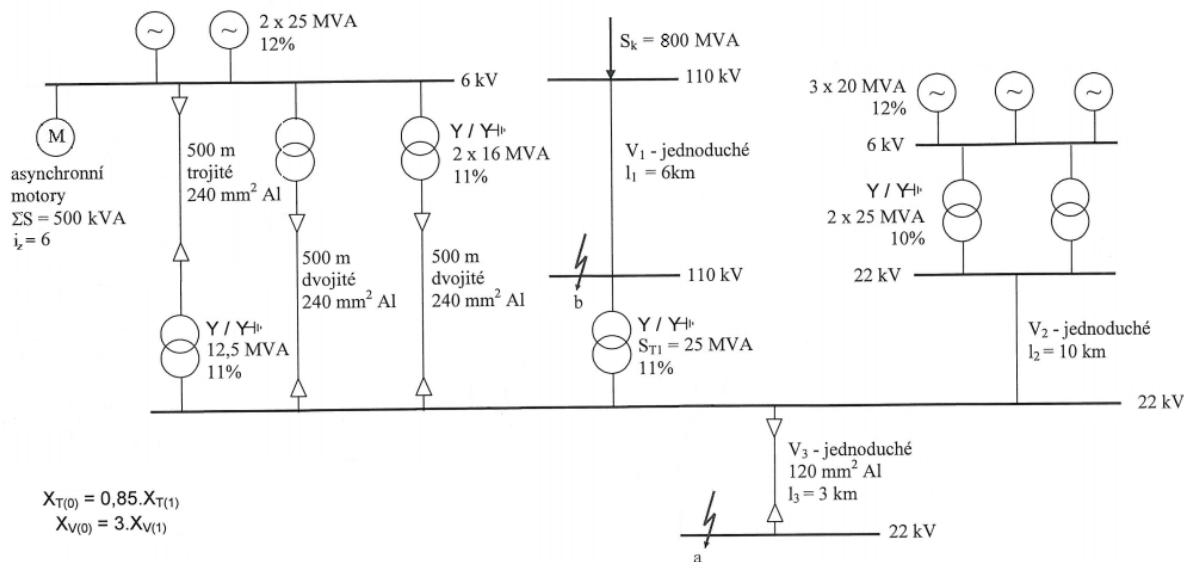
Jouleův integrál a ekvivalentní oteplovací zkratový proud mají být udány s dobou trvání zkratu, se kterým jsou spojeny. V opačném případě se předpokládá doba $T_k = 1$ s.

Pro elektricky vzdálené zkraty lze obvykle použít $n = 1$. Pokud zároveň doba trvání zkratu nabývá 0,5 s nebo více, je dovoleno uvažovat $m + n = 1$. Postup stanovení součinitelů m a n je podrobněji popsán v normě ČSN EN 60909.

4 Příklad výpočtu zkratových proudů

4.1 Vstupní údaje

Obrázek 4-1 Schéma elektrizační soustavy pro výpočet trojfázového, dvoufázového a jednofázového zkratového proudu v zadaných místech schématu



Tabulka 4-1 Vstupní hodnoty síťových napáječů

	$U_n \text{ (kV)}$	$S_k \text{ (MVA)}$
S1	110	800

Tabulka 4-2 Vstupní hodnoty synchronních generátorů

	$U_{nG} \text{ (kV)}$	$S_{nG} \text{ (MVA)}$	$x_d'' \text{ (\%)} $
G1	6	20	12
G2	6	20	12
G3	6	20	12
G4	6	25	12
G5	6	25	12

Tabulka 4-3 Vstupní hodnoty transformátorů

	U (kV)	S_{nT} (MVA)	zapojení	u_k (%)	P_{krT} (kW)
T1	110/22	25	Y/Yn	11	65
T2	22/6	25	Y/Yn	10	100
T3	22/6	25	Y/Yn	10	100
T4	22/6	16	Y/Yn	11	75
T5	22/6	16	Y/Yn	11	75
T6	22/6	12,5	Y/Yn	11	60

Uvažuje se $X_{(0)T} = 0,85 X_{(1)T}$ a $R_{(0)T} = 0,85 R_{(1)T}$.

Tabulka 4-4 Vstupní hodnoty venkovních a kabelových vedení

	l (m)	provedení	S (mm ²)	typ	R_k (Ω km ⁻¹)	X_k (Ω km ⁻¹)
V1	6	jednoduché	185	110-AlFe6	0,156	0,409
V2	10	jednoduché	240	22-AlFe6	0,125	0,400
V3	3	jednoduché	120	22-AXEKVCEY	0,253	0,126
V4	0,5	dvojité	240	22-AXEKVCEY	0,125	0,113
V5	0,5	dvojité	240	22-AXEKVCEY	0,125	0,113
V6	0,5	trojité	240	6-AXEKVCEY	0,125	0,104

Uvažuje se $X_{(0)V} = 3 X_{(1)V}$ a $R_{(0)V} = 3 R_{(1)V}$.

Tabulka 4-5 Vstupní hodnoty asynchronních motorů

	U_{nM} (kV)	S_{nM} (MVA)	i_z (-)
M1	6	0,5	6

4.2 Stanovení reaktancí a rezistancí prvků elektrizační soustavy

4.2.1 Skutečné hodnoty

Soustava:

$$X_{(1)S1} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 110^2}{800} = 16,64 \, \Omega$$

Alternátory:

$$X_{(1)G1} = X_{(1)G2} = X_{(1)G3} = \frac{x''_{d1} \cdot U_{nG1}^2}{100 \cdot S_{nG1}} = \frac{12 \cdot 6^2}{100 \cdot 20} = 0,216 \, \Omega$$

$$X_{(1)G4} = X_{(1)G5} = \frac{x''_{d4} \cdot U_{nG4}^2}{100 \cdot S_{nG4}} = \frac{12 \cdot 6^2}{100 \cdot 25} = 1,728 \cdot 10^{-1} \Omega$$

Dvouvinut'ové transformátory:

$$X_{(1)T1} = \frac{u_{kT1} \cdot U_{nT1}^2}{100 \cdot S_{nT1}} = \frac{11 \cdot 110^2}{100 \cdot 25} = 53,24 \Omega$$

$$X_{(0)T1} = 0,85 \cdot X_{(1)T1} = 0,85 \cdot 53,24 = 45,25 \Omega$$

$$R_{(1)T1} = \frac{P_{krT1} \cdot U_{nT1}^2}{S_{nT1}^2} = \frac{0,065 \cdot 110^2}{25^2} = 1,258 \Omega$$

$$R_{(0)T1} = 0,85 \cdot R_{(1)T1} = 0,85 \cdot 1,258 = 1,069 \Omega$$

$$X_{(1)T2} = X_{(1)T3} = \frac{u_{kT2} \cdot U_{nT2}^2}{100 \cdot S_{nT2}} = \frac{10 \cdot 22^2}{100 \cdot 25} = 1,936 \Omega$$

$$X_{(0)T2} = X_{(0)T3} = 0,85 \cdot X_{(1)T2} = 0,85 \cdot 1,936 = 1,646 \Omega$$

$$R_{(1)T2} = R_{(1)T3} = \frac{P_{krT2} \cdot U_{nT2}^2}{S_{nT2}^2} = \frac{0,1 \cdot 22^2}{25^2} = 7,744 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(0)T2} = R_{(0)T3} = 0,85 \cdot R_{(1)T2} = 0,85 \cdot 7,744 \cdot 10^{-2} = 6,582 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$X_{(1)T4} = X_{(1)T5} = \frac{u_{kT4} \cdot U_{nT4}^2}{100 \cdot S_{nT4}} = \frac{11 \cdot 22^2}{100 \cdot 16} = 3,328 \Omega$$

$$X_{(0)T4} = X_{(0)T5} = 0,85 \cdot X_{(1)T4} = 0,85 \cdot 3,328 = 2,829 \Omega$$

$$R_{(1)T4} = R_{(1)T5} = \frac{P_{krT4} \cdot U_{nT4}^2}{S_{nT4}^2} = \frac{0,075 \cdot 22^2}{16^2} = 1,418 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(0)T4} = R_{(0)T5} = 0,85 \cdot R_{(1)T4} = 0,85 \cdot 1,418 \cdot 10^{-1} = 1,205 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$X_{(1)T6} = \frac{u_{kT6} \cdot U_{nT6}^2}{100 \cdot S_{nT6}} = \frac{11 \cdot 22^2}{100 \cdot 12,5} = 4,259 \Omega$$

$$X_{(0)T6} = 0,85 \cdot X_{(1)T6} = 0,85 \cdot 4,259 = 3,62 \Omega$$

$$R_{(1)T6} = \frac{P_{krT6} \cdot U_{nT6}^2}{S_{nT6}^2} = \frac{0,06 \cdot 22^2}{12,5^2} = 1,859 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(0)T6} = 0,85 \cdot R_{(1)T6} = 0,85 \cdot 1,859 \cdot 10^{-1} = 0,158 \Omega$$

Venkovní a kabelová vedení:

$$X_{(1)V1} = X_{kV1} \cdot l_{V1} = 0,409 \cdot 6 = 2,454 \, \Omega$$

$$R_{(1)V1} = R_{kV1} \cdot l_{V1} = 0,156 \cdot 6 = 0,936 \, \Omega$$

$$X_{(0)V1} = 3 \cdot X_{(1)V1} = 3 \cdot 2,454 = 7,362 \, \Omega$$

$$R_{(0)V1} = 3 \cdot R_{(1)V1} = 3 \cdot 0,936 = 2,808 \, \Omega$$

$$X_{(1)V2} = X_{kV2} \cdot l_{V2} = 0,400 \cdot 10 = 4 \, \Omega$$

$$R_{(1)V2} = R_{kV2} \cdot l_{V2} = 0,125 \cdot 10 = 1,25 \, \Omega$$

$$X_{(0)V2} = 3 \cdot X_{(1)V2} = 3 \cdot 4 = 12 \, \Omega$$

$$R_{(0)V2} = 3 \cdot R_{(1)V2} = 3 \cdot 1,25 = 3,75 \, \Omega$$

$$X_{(1)V3} = X_{kV3} \cdot l_{V3} = 0,126 \cdot 3 = 0,378 \, \Omega$$

$$R_{(1)V3} = R_{kV3} \cdot l_{V3} = 0,253 \cdot 3 = 0,759 \, \Omega$$

$$X_{(0)V3} = 3 \cdot X_{(1)V3} = 3 \cdot 0,378 = 1,134 \, \Omega$$

$$R_{(0)V3} = 3 \cdot R_{(1)V3} = 3 \cdot 0,759 = 2,277 \, \Omega$$

$$X_{(1)V4} = X_{(1)V5} = \frac{1}{2} \cdot X_{kV4} \cdot l_{V4} = \frac{1}{2} \cdot 0,113 \cdot 0,5 = 2,825 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(1)V4} = R_{(1)V5} = \frac{1}{2} \cdot R_{kV4} \cdot l_{V4} = \frac{1}{2} \cdot 0,125 \cdot 0,5 = 3,125 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$X_{(0)V4} = X_{(0)V5} = 3 \cdot X_{(1)V4} = 3 \cdot 2,825 \cdot 10^{-2} = 8,475 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(0)V4} = R_{(0)V5} = 3 \cdot R_{(1)V4} = 3 \cdot 3,125 \cdot 10^{-2} = 9,375 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$X_{(1)V6} = \frac{1}{3} \cdot X_{kV6} \cdot l_{V6} = \frac{1}{3} \cdot 0,104 \cdot 0,5 = 1,733 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(1)V6} = \frac{1}{3} \cdot R_{kV6} \cdot l_{V6} = \frac{1}{3} \cdot 0,125 \cdot 0,5 = 2,083 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$X_{(0)V6} = 3 \cdot X_{(1)V6} = 3 \cdot 1,733 \cdot 10^{-2} = 5,199 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(0)V6} = 3 \cdot R_{(1)V6} = 3 \cdot 2,083 \cdot 10^{-2} = 6,249 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

Asynchronní motor:

$$X_{(1)M1} = \frac{1}{i_z} \cdot \frac{U_{nM}^2}{S_{nM}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{6^2}{0,5} = 12 \, \Omega$$

4.2.2 Přepoččet parametrů na napěťovou hladinu zkratu A**Soustava:**

$$X_{(1)S1A} = X_{(1)S1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nS1}} \right)^2 = 16,64 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 0,666 \, \Omega$$

Alternátory:

$$X_{(1)G1A} = X_{(1)G2A} = X_{(1)G3A} = X_{(1)G1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nG1}} \right)^2 = 0,216 \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 2,904 \, \Omega$$

$$X_{(1)G4A} = X_{(1)G5A} = X_{(1)G4} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nG4}} \right)^2 = 1,728 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 2,323 \, \Omega$$

Dvouvinutové transformátory:

$$X_{(1)T1A} = X_{(1)T1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nT1}} \right)^2 = 53,24 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 2,13 \, \Omega$$

$$X_{(0)T1A} = X_{(0)T1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nT1}} \right)^2 = 45,25 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 1,81 \, \Omega$$

$$R_{(1)T1A} = R_{(1)T1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nT1}} \right)^2 = 1,258 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 5,032 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(0)T1A} = R_{(0)T1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nT1}} \right)^2 = 1,069 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 4,276 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$X_{(1)T2A} = X_{(1)T3A} = X_{(1)T2} = X_{(1)T3} = 1,936 \, \Omega$$

$$X_{(0)T2A} = X_{(0)T3A} = X_{(0)T2} = X_{(0)T3} = 1,646 \, \Omega$$

$$R_{(1)T2A} = R_{(1)T3A} = R_{(1)T2} = R_{(1)T3} = 7,744 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$R_{(0)T2A} = R_{(0)T3A} = R_{(0)T2} = R_{(0)T3} = 6,582 \cdot 10^{-2} \, \Omega$$

$$X_{(1)T4A} = X_{(1)T5A} = X_{(1)T4} = X_{(1)T5} = 3,328 \, \Omega$$

$$X_{(0)T4A} = X_{(0)T5A} = X_{(0)T4} = X_{(0)T5} = 2,829 \, \Omega$$

$$R_{(1)T4A} = R_{(1)T5A} = R_{(1)T4} = R_{(1)T5} = 1,418 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(0)T4A} = R_{(0)T5A} = R_{(0)T4} = R_{(0)T5} = 1,205 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$X_{(1)T6A} = X_{(1)T6} = 4,259 \Omega$$

$$X_{(0)T6A} = X_{(0)T6} = 3,62 \Omega$$

$$R_{(1)T6A} = R_{(1)T6} = 1,859 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(0)T6A} = R_{(0)T6} = 0,158 \Omega$$

Venkovní a kabelová vedení:

$$X_{(1)V1A} = X_{(1)V1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV1}} \right)^2 = 2,454 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 9,816 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(1)V1A} = R_{(1)V1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV1}} \right)^2 = 0,936 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 3,744 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$X_{(0)V1A} = X_{(0)V1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV1}} \right)^2 = 7,362 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 2,945 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(0)V1A} = R_{(0)V1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV1}} \right)^2 = 2,808 \cdot \left(\frac{22}{110} \right)^2 = 1,123 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$X_{(1)V2A} = X_{(1)V2} = 4 \Omega$$

$$R_{(1)V2A} = R_{(1)V2} = 1,25 \Omega$$

$$X_{(0)V2A} = X_{(0)V2} = 12 \Omega$$

$$R_{(0)V2A} = R_{(0)V2} = 3,75 \Omega$$

$$X_{(1)V3A} = X_{(1)V3} = 0,378 \Omega$$

$$R_{(1)V3A} = R_{(1)V3} = 0,759 \Omega$$

$$X_{(0)V3A} = X_{(0)V3} = 1,134 \Omega$$

$$R_{(0)V3A} = R_{(0)V3} = 2,277 \Omega$$

$$X_{(1)V4A} = X_{(1)V5A} = X_{(1)V4} = X_{(1)V5} = 2,825 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(1)V4A} = R_{(1)V5A} = R_{(1)V4} = R_{(1)V5} = 3,125 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$X_{(0)V4A} = X_{(0)V5A} = X_{(0)V4} = X_{(0)V5} = 8,475 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(0)V4A} = R_{(0)V5A} = R_{(0)V4} = R_{(0)V5} = 9,375 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$X_{(1)V6A} = X_{(1)V6} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV6}} \right)^2 = 1,733 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 0,233 \Omega$$

$$R_{(1)V6A} = R_{(1)V6} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV6}} \right)^2 = 2,083 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 0,28 \Omega$$

$$X_{(0)V6A} = X_{(0)V6} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV6}} \right)^2 = 5,199 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 0,699 \Omega$$

$$R_{(0)V6A} = R_{(0)V6} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nV6}} \right)^2 = 6,249 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 8,401 \cdot 10^{-1} \Omega$$

Asynchronní motor:

$$X_{(1)M1A} = X_{(1)M1} \cdot \left(\frac{U_{nA}}{U_{nM1}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{22}{6} \right)^2 = 161,3 \Omega$$

4.2.3 Přepočet parametrů na napětřovou hladinu zkratu B

Soustava:

$$X_{(1)S1B} = X_{(1)S1} = 16,64 \Omega$$

Alternátory:

$$X_{(1)G1B} = X_{(1)G2B} = X_{(1)G3B} = X_{(1)G1} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nG1}} \right)^2 = 0,216 \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 72,6 \Omega$$

$$X_{(1)G4B} = X_{(1)G5B} = X_{(1)G4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nG4}} \right)^2 = 1,728 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 58,08 \Omega$$

Dvouvinutové transformátory:

$$X_{(1)T1B} = X_{(1)T1} = 53,24 \Omega$$

$$X_{(0)T1B} = X_{(0)T1} = 45,25 \Omega$$

$$R_{(1)T1B} = R_{(1)T1} = 1,258 \Omega$$

$$R_{(0)T1B} = R_{(0)T1} = 1,069 \Omega$$

$$X_{(1)T2B} = X_{(1)T3B} = X_{(1)T2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT2}}\right)^2 = 1,936 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 48,4 \Omega$$

$$X_{(0)T2B} = X_{(0)T3B} = X_{(0)T2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT2}}\right)^2 = 1,646 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 41,15 \Omega$$

$$R_{(1)T2B} = R_{(1)T3B} = R_{(1)T2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT2}}\right)^2 = 7,744 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 1,936 \Omega$$

$$R_{(0)T2B} = R_{(0)T3B} = R_{(0)T2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT2}}\right)^2 = 6,582 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 1,646 \Omega$$

$$X_{(1)T4B} = X_{(1)T5B} = X_{(1)T4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT4}}\right)^2 = 3,328 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 83,2 \Omega$$

$$X_{(0)T4B} = X_{(0)T5B} = X_{(0)T4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT4}}\right)^2 = 2,829 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 70,73 \Omega$$

$$R_{(1)T4B} = R_{(1)T5B} = R_{(1)T4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT4}}\right)^2 = 1,418 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 3,545 \Omega$$

$$R_{(0)T4B} = R_{(0)T5B} = R_{(0)T4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT4}}\right)^2 = 1,205 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 3,013 \Omega$$

$$X_{(1)T6B} = X_{(1)T6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT6}}\right)^2 = 4,259 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 106,5 \Omega$$

$$X_{(0)T6B} = X_{(0)T6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT6}}\right)^2 = 3,62 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 90,5 \Omega$$

$$R_{(1)T6B} = R_{(1)T6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT6}}\right)^2 = 1,859 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 4,648 \Omega$$

$$R_{(0)T6B} = R_{(0)T6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nT6}}\right)^2 = 0,158 \cdot \left(\frac{110}{22}\right)^2 = 3,95 \Omega$$

Venkovní a kabelová vedení:

$$X_{(1)V1B} = X_{(1)V1} = 2,454 \Omega$$

$$R_{(1)V1B} = R_{(1)V1} = 0,936 \Omega$$

$$X_{(0)V1B} = X_{(0)V1} = 7,362 \Omega$$

$$R_{(0)V1B} = R_{(0)V1} = 2,808 \, \Omega$$

$$X_{(1)V2B} = X_{(1)V2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV2}} \right)^2 = 4 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 100 \, \Omega$$

$$R_{(1)V2B} = R_{(1)V2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV2}} \right)^2 = 1,25 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 31,25 \, \Omega$$

$$X_{(0)V2B} = X_{(0)V2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV2}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 300 \, \Omega$$

$$R_{(0)V2B} = R_{(0)V2} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV2}} \right)^2 = 3,75 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 93,75 \, \Omega$$

$$X_{(1)V3B} = X_{(1)V3} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV3}} \right)^2 = 0,378 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 9,45 \, \Omega$$

$$R_{(1)V3B} = R_{(1)V3} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV3}} \right)^2 = 0,759 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 18,98 \, \Omega$$

$$X_{(0)V3B} = X_{(0)V3} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV3}} \right)^2 = 1,134 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 28,35 \, \Omega$$

$$R_{(0)V3B} = R_{(0)V3} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV3}} \right)^2 = 2,277 \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 56,93 \, \Omega$$

$$X_{(1)V4B} = X_{(1)V5B} = X_{(1)V4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV4}} \right)^2 = 2,825 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 7,063 \cdot 10^{-1} \, \Omega$$

$$R_{(1)V4B} = R_{(1)V5B} = R_{(1)V4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV4}} \right)^2 = 3,125 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 7,813 \cdot 10^{-1} \, \Omega$$

$$X_{(0)V4B} = X_{(0)V5B} = X_{(0)V4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV4}} \right)^2 = 8,475 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 2,119 \, \Omega$$

$$R_{(0)V4B} = R_{(0)V5B} = R_{(0)V4} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV4}} \right)^2 = 9,375 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{22} \right)^2 = 2,344 \, \Omega$$

$$X_{(1)V6B} = X_{(1)V6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV6}} \right)^2 = 1,733 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 5,825 \, \Omega$$

$$R_{(1)V6B} = R_{(1)V6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV6}} \right)^2 = 2,083 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 7,001 \, \Omega$$

$$X_{(0)V6B} = X_{(0)V6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV6}} \right)^2 = 5,199 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 17,47 \, \Omega$$

$$R_{(0)V6B} = R_{(0)V6} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nV6}} \right)^2 = 6,249 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 21 \, \Omega$$

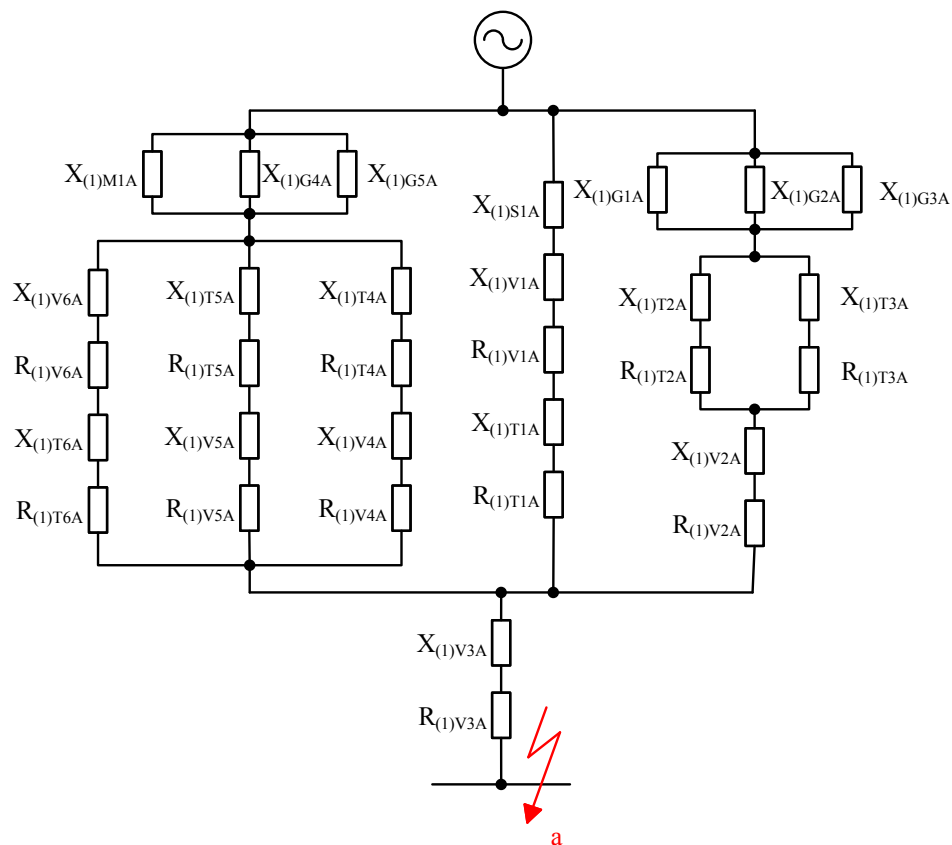
Asynchronní motor:

$$X_{(1)M1B} = X_{(1)M1} \cdot \left(\frac{U_{nB}}{U_{nM1}} \right)^2 = 12 \cdot \left(\frac{110}{6} \right)^2 = 4033 \, \Omega$$

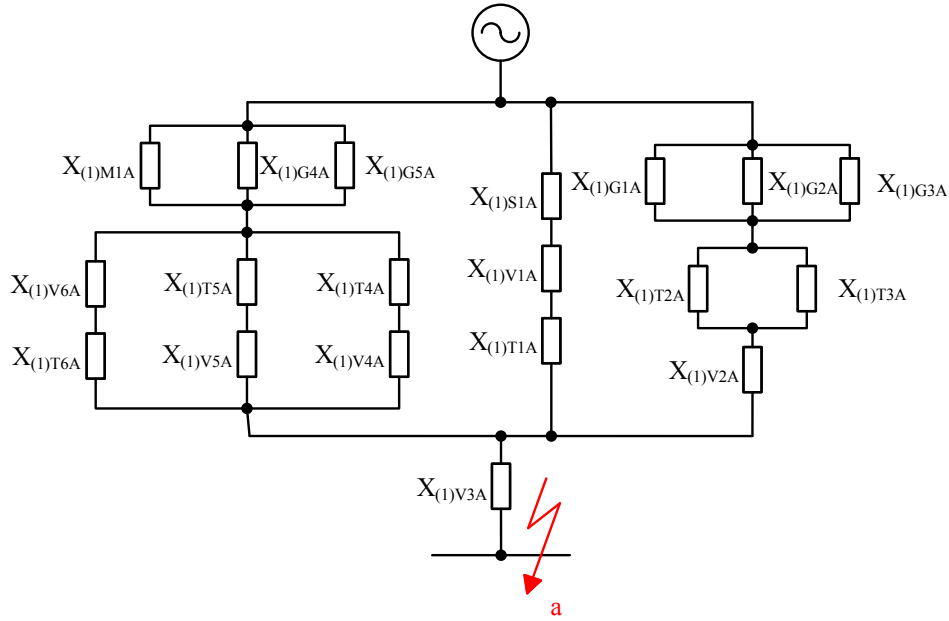
4.3 Stanovení zkratové impedance

4.3.1 Zkrat v místě A – sousledná složka zkratové impedance

Obrázek 4-2 Náhradní schéma sousledné složky impedance při zkratu v místě A



Obrázek 4-3 Náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě A



$$X_{(1)1A} = \frac{X_{(1)G1A} \cdot X_{(1)G2A} \cdot X_{(1)G3A}}{X_{(1)G1A} \cdot X_{(1)G2A} + X_{(1)G1A} \cdot X_{(1)G3A} + X_{(1)G2A} \cdot X_{(1)G3A}} =$$

$$= \frac{2,904 \cdot 2,904 \cdot 2,904}{2,904 \cdot 2,904 + 2,904 \cdot 2,904 + 2,904 \cdot 2,904} = 0,968 \, \Omega$$

$$X_{(1)2A} = \frac{X_{(1)T2A} \cdot X_{(1)T3A}}{X_{(1)T2A} + X_{(1)T3A}} = \frac{1,936 \cdot 1,936}{1,936 + 1,936} = 0,968 \, \Omega$$

$$X_{(1)3A} = \frac{X_{(1)M1A} \cdot X_{(1)G4A} \cdot X_{(1)G5A}}{X_{(1)M1A} \cdot X_{(1)G4A} + X_{(1)M1A} \cdot X_{(1)G5A} + X_{(1)G4A} \cdot X_{(1)G5A}} =$$

$$= \frac{161,3 \cdot 2,323 \cdot 2,323}{161,3 \cdot 2,323 + 161,3 \cdot 2,323 + 2,323 \cdot 2,323} = 1,153 \, \Omega$$

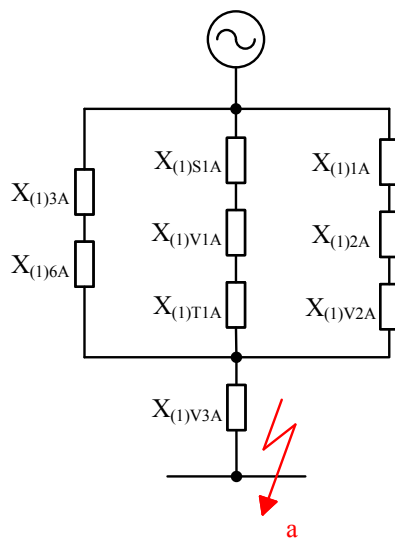
$$X_{(1)4A} = X_{(1)T4A} + X_{(1)V4A} = X_{(1)T5A} + X_{(1)V5A} = 3,328 + 2,825 \cdot 10^{-2} = 3,356 \, \Omega$$

$$X_{(1)5A} = X_{(1)T6A} + X_{(1)V6A} = 4,259 + 0,233 = 4,492 \, \Omega$$

$$X_{(1)6A} = \frac{X_{(1)5A} \cdot X_{(1)4A} \cdot X_{(1)4A}}{X_{(1)5A} \cdot X_{(1)4A} + X_{(1)5A} \cdot X_{(1)4A} + X_{(1)4A} \cdot X_{(1)4A}} =$$

$$= \frac{4,492 \cdot 3,356 \cdot 3,356}{4,492 \cdot 3,356 + 4,492 \cdot 3,356 + 3,356 \cdot 3,356} = 1,222 \, \Omega$$

Obrázek 4-4 Zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě A



$$X_{(1)7A} = X_{(1)1A} + X_{(1)2A} + X_{(1)V2A} = 0,968 + 0,968 + 4 = 5,936 \, \Omega$$

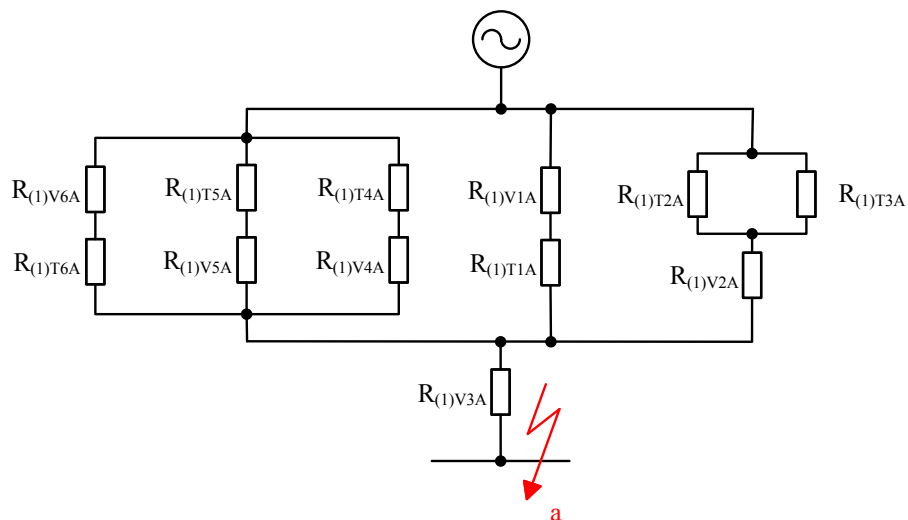
$$X_{(1)8A} = X_{(1)S1A} + X_{(1)V1A} + X_{(1)T1A} = 0,666 + 9,816 \cdot 10^{-2} + 2,13 = 2,894 \, \Omega$$

$$X_{(1)9A} = X_{(1)3A} + X_{(1)6A} = 1,153 + 1,222 = 2,375 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} X_{(1)10A} &= \frac{X_{(1)7A} \cdot X_{(1)8A} \cdot X_{(1)9A}}{X_{(1)7A} \cdot X_{(1)8A} + X_{(1)7A} \cdot X_{(1)9A} + X_{(1)8A} \cdot X_{(1)9A}} = \\ &= \frac{5,936 \cdot 2,894 \cdot 2,375}{5,936 \cdot 2,894 + 5,936 \cdot 2,375 + 2,894 \cdot 2,375} = 1,069 \, \Omega \end{aligned}$$

$$X_{(1)A} = X_{(1)10A} + X_{(1)V3A} = 1,069 + 0,378 = 1,447 \, \Omega$$

Obrázek 4-5 Náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě A



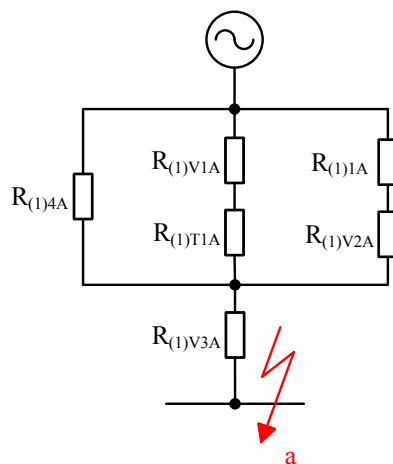
$$R_{(1)1A} = \frac{R_{(1)T2A} \cdot R_{(1)T3A}}{R_{(1)T2A} + R_{(1)T3A}} = \frac{7,744 \cdot 10^{-2} \cdot 7,744 \cdot 10^{-2}}{7,744 \cdot 10^{-2} + 7,744 \cdot 10^{-2}} = 3,872 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(1)2A} = R_{(1)T4A} + R_{(1)V4A} = R_{(1)T5A} + R_{(1)V5A} = 1,418 \cdot 10^{-1} + 3,125 \cdot 10^{-2} = 1,731 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$R_{(1)3A} = R_{(1)T6A} + R_{(1)V6A} = 1,859 \cdot 10^{-1} + 0,28 = 4,659 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$\begin{aligned} R_{(1)4A} &= \frac{R_{(1)3A} \cdot R_{(1)2A} \cdot R_{(1)2A}}{R_{(1)3A} \cdot R_{(1)2A} + R_{(1)3A} \cdot R_{(1)2A} + R_{(1)2A} \cdot R_{(1)2A}} = \\ &= \frac{4,659 \cdot 10^{-1} \cdot 1,731 \cdot 10^{-1} \cdot 1,731 \cdot 10^{-1}}{4,659 \cdot 10^{-1} \cdot 1,731 \cdot 10^{-1} + 4,659 \cdot 10^{-1} \cdot 1,731 \cdot 10^{-1} + 1,731 \cdot 10^{-1} \cdot 1,731 \cdot 10^{-1}} = \\ &= 7,299 \cdot 10^{-2} \Omega \end{aligned}$$

Obrázek 4-6 Zjednodušené náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě A



$$R_{(1)5A} = R_{(1)V1A} + R_{(1)T1A} = 3,744 \cdot 10^{-2} + 5,032 \cdot 10^{-2} = 8,776 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(1)6A} = R_{(1)1A} + R_{(1)V2A} = 3,872 \cdot 10^{-2} + 1,25 = 1,289 \Omega$$

$$\begin{aligned} R_{(1)7A} &= \frac{R_{(1)4A} \cdot R_{(1)5A} \cdot R_{(1)6A}}{R_{(1)4A} \cdot R_{(1)5A} + R_{(1)4A} \cdot R_{(1)6A} + R_{(1)5A} \cdot R_{(1)6A}} = \\ &= \frac{7,299 \cdot 10^{-2} \cdot 8,776 \cdot 10^{-2} \cdot 1,289}{7,299 \cdot 10^{-2} \cdot 8,776 \cdot 10^{-2} + 7,299 \cdot 10^{-2} \cdot 1,289 + 8,776 \cdot 10^{-2} \cdot 1,289} = \\ &= 3,865 \cdot 10^{-2} \Omega \end{aligned}$$

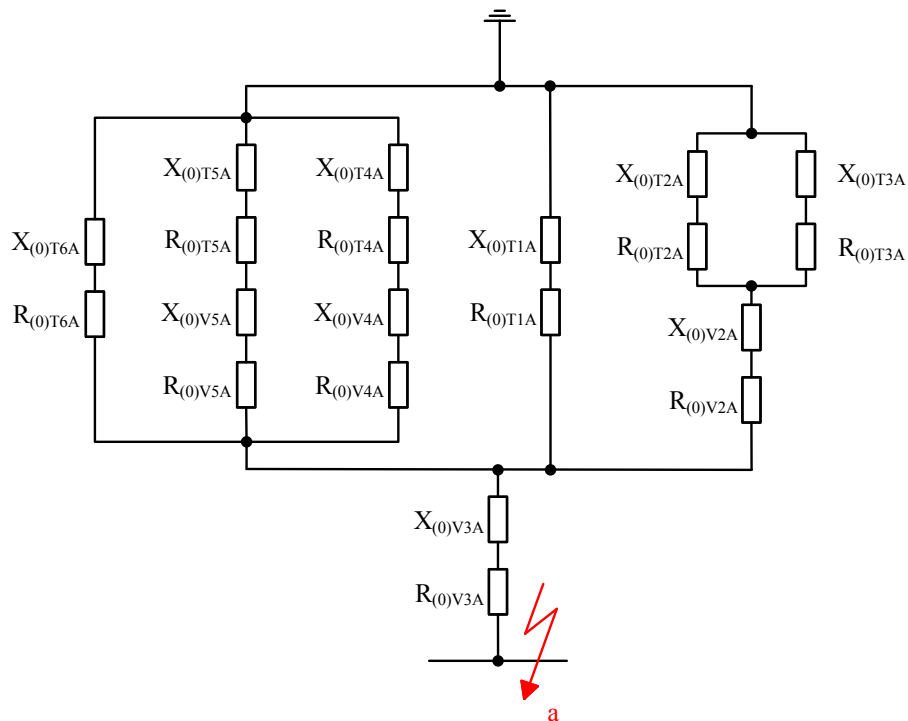
$$R_{(1)A} = R_{(1)7A} + R_{(1)V3A} = 3,865 \cdot 10^{-2} + 0,759 = 7,977 \cdot 10^{-1} \Omega$$

Sousledná složka zkratové impedance pro zkrat v místě A:

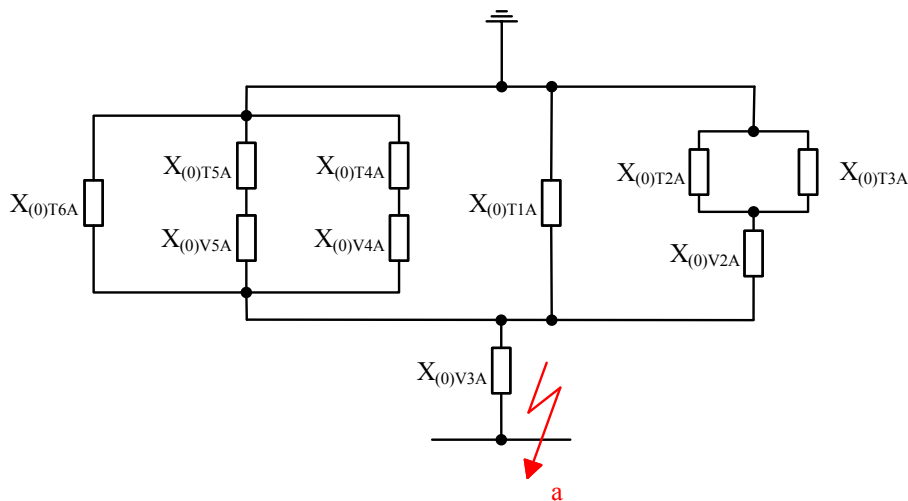
$$\underline{Z}_{(1)A} = \sqrt{R_{(1)A}^2 + X_{(1)A}^2} = \sqrt{(7,977 \cdot 10^{-1})^2 + 1,447^2} = 1,652 \Omega$$

4.3.2 Zkrat v místě A – nulová složka zkratové impedance

Obrázek 4-7 Náhradní schéma nulové složky impedance při zkratu v místě A



Obrázek 4-8 Náhradní schéma reaktance nulové složky při zkratu v místě A



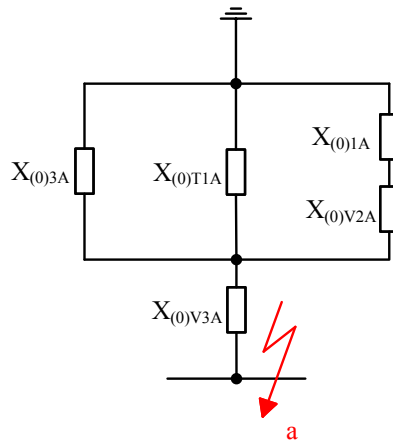
$$X_{(0)1A} = \frac{X_{(0)T2A} \cdot X_{(0)T3A}}{X_{(0)T2A} + X_{(0)T3A}} = \frac{1,646 \cdot 1,646}{1,646 + 1,646} = 0,823 \, \Omega$$

$$X_{(0)2A} = X_{(0)T4A} + X_{(0)V4A} = X_{(0)T5A} + X_{(0)V5A} = 2,829 + 8,475 \cdot 10^{-2} = 2,914 \, \Omega$$

$$X_{(0)3A} = \frac{X_{(0)T6A} \cdot X_{(0)2A} \cdot X_{(0)2A}}{X_{(0)T6A} \cdot X_{(0)2A} + X_{(0)T6A} \cdot X_{(0)2A} + X_{(0)2A} \cdot X_{(0)2A}} =$$

$$= \frac{3,62 \cdot 2,914 \cdot 2,914}{3,62 \cdot 2,914 + 3,62 \cdot 2,914 + 2,914 \cdot 2,914} = 1,039 \, \Omega$$

Obrázek 4-9 Zjednodušené náhradní schéma reaktance nulové složky při zkratu v místě A



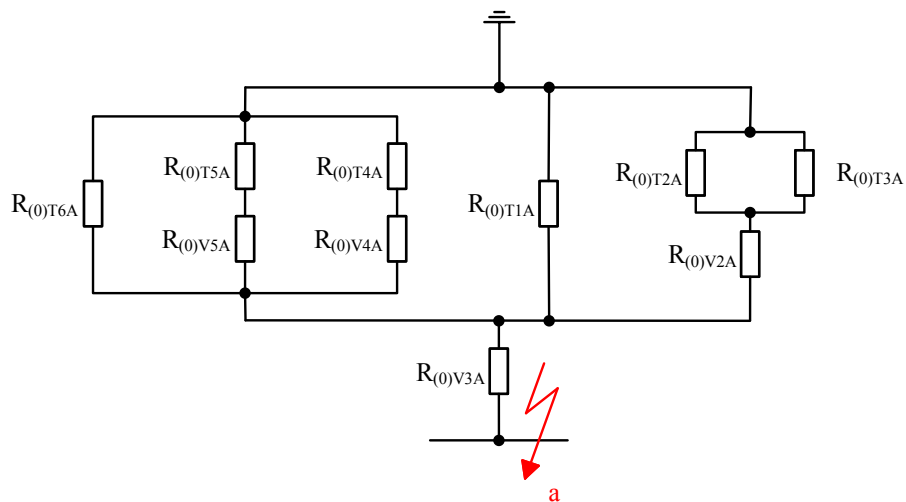
$$X_{(0)4A} = X_{(0)1A} + X_{(0)V2A} = 0,823 + 12 = 12,823 \, \Omega$$

$$X_{(0)5A} = \frac{X_{(0)3A} \cdot X_{(0)T1A} \cdot X_{(0)4A}}{X_{(0)3A} \cdot X_{(0)T1A} + X_{(0)3A} \cdot X_{(0)4A} + X_{(0)T1A} \cdot X_{(0)4A}} =$$

$$= \frac{1,039 \cdot 1,81 \cdot 12,823}{1,039 \cdot 1,81 + 1,039 \cdot 12,823 + 1,81 \cdot 12,823} = 6,278 \cdot 10^{-1} \, \Omega$$

$$X_{(0)A} = X_{(0)5A} + X_{(0)V3A} = 6,278 \cdot 10^{-1} + 1,134 = 1,762 \, \Omega$$

Obrázek 4-10 Náhradní schéma rezistance nulové složky při zkratu v místě A

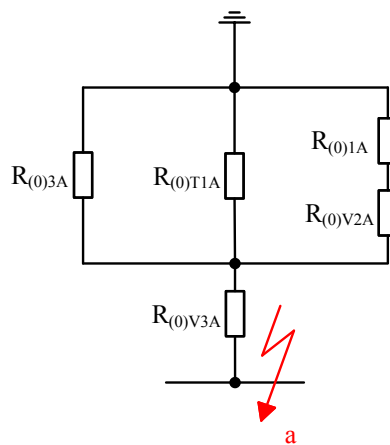


$$R_{(0)1A} = \frac{R_{(0)T2A} \cdot R_{(0)T3A}}{R_{(0)T2A} + R_{(0)T3A}} = \frac{6,582 \cdot 10^{-2} \cdot 6,582 \cdot 10^{-2}}{6,582 \cdot 10^{-2} + 6,582 \cdot 10^{-2}} = 3,291 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$R_{(0)2A} = R_{(0)T4A} + R_{(0)V4A} = R_{(0)T5A} + R_{(0)V5A} = 1,205 \cdot 10^{-1} + 9,375 \cdot 10^{-2} = 2,143 \cdot 10^{-1} \Omega$$

$$\begin{aligned} R_{(0)3A} &= \frac{R_{(0)T6A} \cdot R_{(0)2A} \cdot R_{(0)2A}}{R_{(0)T6A} \cdot R_{(0)2A} + R_{(0)T6A} \cdot R_{(0)2A} + R_{(0)2A} \cdot R_{(0)2A}} = \\ &= \frac{0,158 \cdot 2,143 \cdot 10^{-1} \cdot 2,143 \cdot 10^{-1}}{0,158 \cdot 2,143 \cdot 10^{-1} + 0,158 \cdot 2,143 \cdot 10^{-1} + 2,143 \cdot 10^{-1} \cdot 2,143 \cdot 10^{-1}} = \\ &= 6,385 \cdot 10^{-2} \Omega \end{aligned}$$

Obrázek 4-11 Zjednodušené náhradní schéma rezistance nulové složky při zkratu v místě A



$$R_{(0)4A} = R_{(0)1A} + R_{(0)V2A} = 3,291 \cdot 10^{-2} + 3,75 = 3,783 \Omega$$

$$\begin{aligned} R_{(0)5A} &= \frac{R_{(0)3A} \cdot R_{(0)T1A} \cdot R_{(0)4A}}{R_{(0)3A} \cdot R_{(0)T1A} + R_{(0)3A} \cdot R_{(0)4A} + R_{(0)T1A} \cdot R_{(0)4A}} = \\ &= \frac{6,385 \cdot 10^{-2} \cdot 4,276 \cdot 10^{-2} \cdot 3,783}{6,385 \cdot 10^{-2} \cdot 4,276 \cdot 10^{-2} + 6,385 \cdot 10^{-2} \cdot 3,783 + 4,276 \cdot 10^{-2} \cdot 3,783} = \\ &= 2,544 \cdot 10^{-2} \Omega \end{aligned}$$

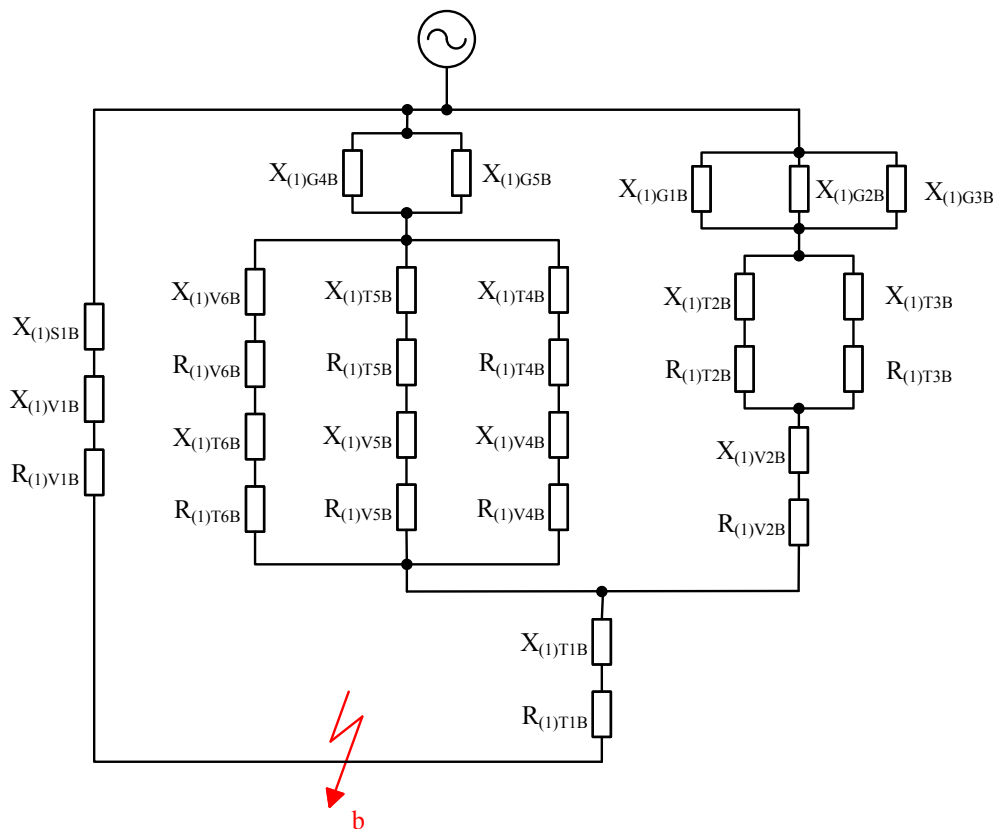
$$R_{(0)A} = R_{(0)5A} + R_{(0)V3A} = 2,544 \cdot 10^{-2} + 2,277 = 2,302 \Omega$$

Nulová složka zkratové impedance pro zkrat v místě A:

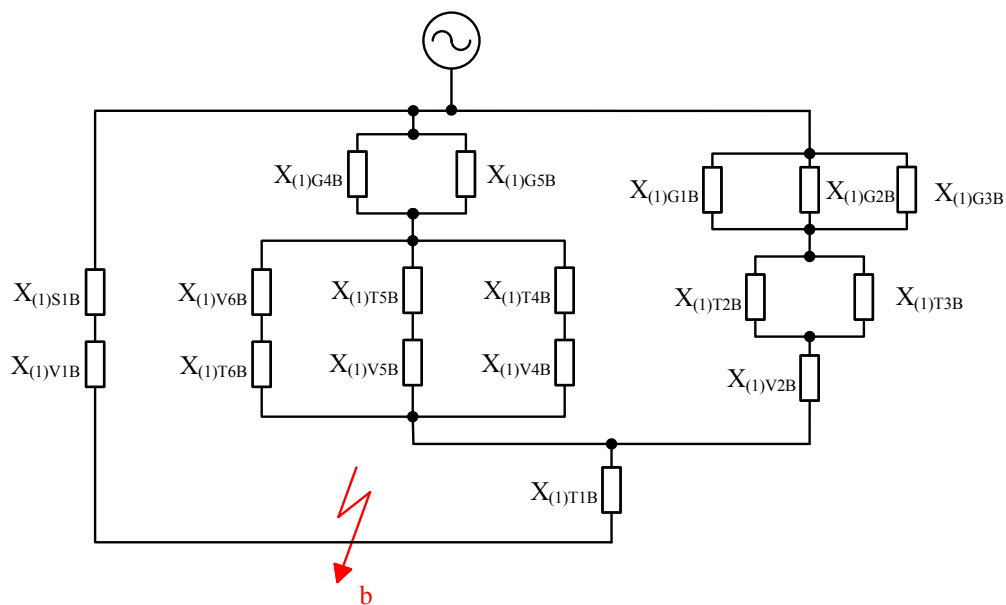
$$\underline{Z}_{(0)A} = \sqrt{R_{(0)A}^2 + X_{(0)A}^2} = \sqrt{2,302^2 + 1,762^2} = 2,899 \Omega$$

4.3.3 Zkrat v místě B – sousledná složka zkratové impedance

Obrázek 4-12 Náhradní schéma sousledné složky impedance při zkratu v místě B



Obrázek 4-13 Náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B



$$X_{(1)1B} = \frac{X_{(1)G1B} \cdot X_{(1)G2B} \cdot X_{(1)G3B}}{X_{(1)G1B} \cdot X_{(1)G2B} + X_{(1)G1B} \cdot X_{(1)G3B} + X_{(1)G2B} \cdot X_{(1)G3B}} =$$

$$= \frac{72,6 \cdot 72,6 \cdot 72,6}{72,6 \cdot 72,6 + 72,6 \cdot 72,6 + 72,6 \cdot 72,6} = 24,2 \, \Omega$$

$$X_{(1)2B} = \frac{X_{(1)T2B} \cdot X_{(1)T3B}}{X_{(1)T2B} + X_{(1)T3B}} = \frac{48,4 \cdot 48,4}{48,4 + 48,4} = 24,2 \, \Omega$$

$$X_{(1)3B} = \frac{X_{(1)G4B} \cdot X_{(1)G5B}}{X_{(1)G4B} + X_{(1)G5B}} = \frac{58,08 \cdot 58,08}{58,08 + 58,08} = 29,04 \, \Omega$$

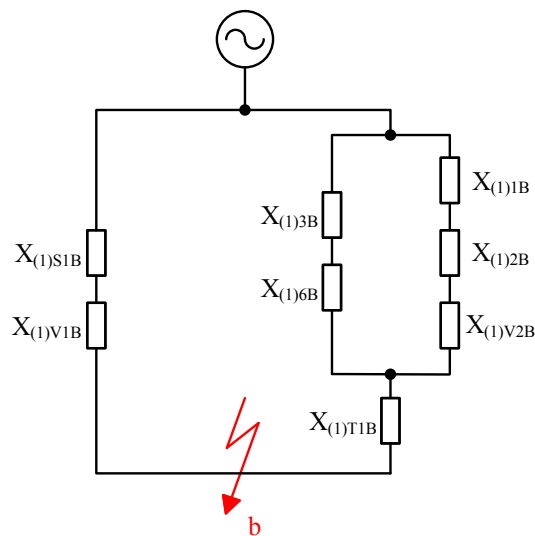
$$X_{(1)4B} = X_{(1)T4B} + X_{(1)V4B} = X_{(1)T5B} + X_{(1)V5B} = 83,2 + 7,063 \cdot 10^{-1} = 83,91 \, \Omega$$

$$X_{(1)5B} = X_{(1)T6B} + X_{(1)V6B} = 106,5 + 5,825 = 112,3 \, \Omega$$

$$X_{(1)6B} = \frac{X_{(1)4B} \cdot X_{(1)4B} \cdot X_{(1)5B}}{X_{(1)4B} \cdot X_{(1)4B} + X_{(1)4B} \cdot X_{(1)5B} + X_{(1)4B} \cdot X_{(1)5B}} =$$

$$= \frac{83,91 \cdot 83,91 \cdot 112,3}{83,91 \cdot 83,91 + 83,91 \cdot 112,3 + 83,91 \cdot 112,3} = 30,54 \, \Omega$$

Obrázek 4-14 Zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B

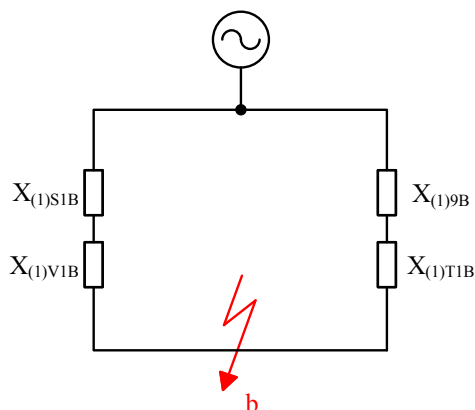


$$X_{(1)7B} = X_{(1)3B} + X_{(1)6B} = 29,04 + 30,54 = 59,58 \, \Omega$$

$$X_{(1)8B} = X_{(1)1B} + X_{(1)2B} + X_{(1)V2B} = 24,2 + 24,2 + 100 = 148,4 \, \Omega$$

$$X_{(1)9B} = \frac{X_{(1)7B} \cdot X_{(1)8B}}{X_{(1)7B} + X_{(1)8B}} = \frac{59,58 \cdot 148,4}{59,58 + 148,4} = 42,51 \, \Omega$$

Obrázek 4-15 Dále zjednodušené náhradní schéma reaktance sousledné složky při zkratu v místě B

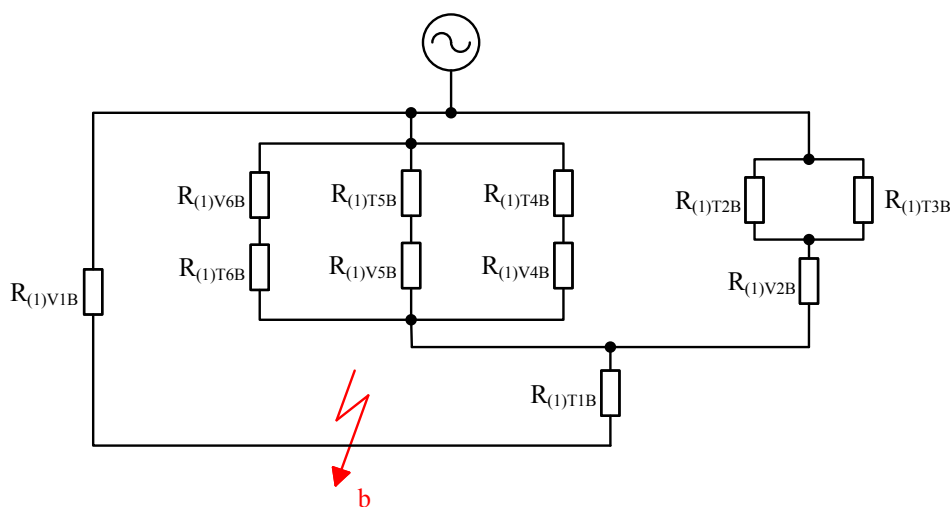


$$X_{(1)10B} = X_{(1)S1B} + X_{(1)V1B} = 16,64 + 2,454 = 19,09 \, \Omega$$

$$X_{(1)11B} = X_{(1)9B} + X_{(1)T1B} = 42,51 + 53,24 = 95,75 \, \Omega$$

$$X_{(1)B} = \frac{X_{(1)10B} \cdot X_{(1)11B}}{X_{(1)10B} + X_{(1)11B}} = \frac{19,09 \cdot 95,75}{19,09 + 95,75} = 15,92 \, \Omega$$

Obrázek 4-16 Náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě B



$$R_{(1)1B} = \frac{R_{(1)T2B} \cdot R_{(1)T3B}}{R_{(1)T2B} + R_{(1)T3B}} = \frac{1,936 \cdot 1,936}{1,936 + 1,936} = 0,968 \, \Omega$$

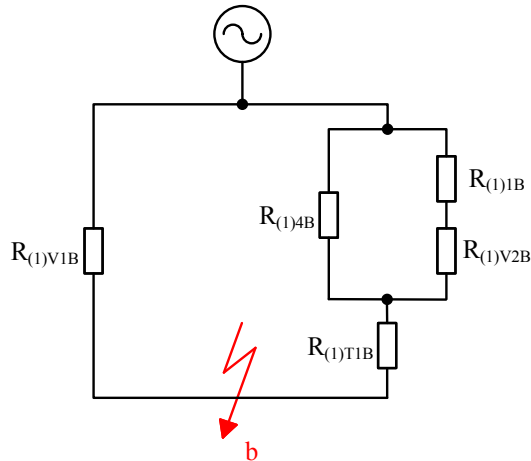
$$R_{(1)2B} = R_{(1)T4B} + R_{(1)V4B} = R_{(1)T5B} + R_{(1)V5B} = 3,545 + 7,813 \cdot 10^{-1} = 4,326 \, \Omega$$

$$R_{(1)3B} = R_{(1)T6B} + R_{(1)V6B} = 4,648 + 7,001 = 11,65 \, \Omega$$

$$R_{(1)4B} = \frac{R_{(1)2B} \cdot R_{(1)2B} \cdot R_{(1)3B}}{R_{(1)2B} \cdot R_{(1)2B} + R_{(1)2B} \cdot R_{(1)3B} + R_{(1)2B} \cdot R_{(1)3B}} =$$

$$= \frac{4,326 \cdot 4,326 \cdot 11,65}{4,326 \cdot 4,326 + 4,326 \cdot 11,65 + 4,326 \cdot 11,65} = 1,824 \, \Omega$$

Obrázek 4-17 Zjednodušené náhradní schéma rezistance sousledné složky při zkratu v místě B



$$R_{(1)5B} = R_{(1)1B} + R_{(1)V2B} = 0,968 + 31,25 = 32,22 \, \Omega$$

$$R_{(1)6B} = \frac{R_{(1)4B} \cdot R_{(1)5B}}{R_{(1)4B} + R_{(1)5B}} = \frac{1,824 \cdot 32,22}{1,824 + 32,22} = 1,726 \, \Omega$$

$$R_{(1)7B} = R_{(1)6B} + R_{(1)T1B} = 1,726 + 1,258 = 2,984 \, \Omega$$

$$R_{(1)B} = \frac{R_{(1)7B} \cdot R_{(1)V1B}}{R_{(1)7B} + R_{(1)V1B}} = \frac{2,984 \cdot 0,936}{2,984 + 0,936} = 7,125 \cdot 10^{-1} \, \Omega$$

Sousledná složka zkratové impedance pro zkrat v místě B:

$$\underline{Z}_{(1)B} = \sqrt{R_{(1)B}^2 + X_{(1)B}^2} = \sqrt{(7,125 \cdot 10^{-1})^2 + 15,92^2} = 15,94 \, \Omega$$

4.3.4 Zkrat v místě B – nulová složka zkratové impedance

Nulová složka zkratové impedance nevzniká, protože se předpokládá, že napáječ S1 je provozován v soustavě s izolovaným uzlem. V této soustavě se nevyskytuje jednofázový zkrat.

4.4 Výpočet zkratových proudů

4.4.1 Zkrat v místě A

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu v místě A:

$$I''_{kA} = \frac{c \cdot U_A}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)A}|} = \frac{1,1 \cdot 22}{\sqrt{3} \cdot 1,652} = 8,458 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu v místě A:

$$I''_{k2A} = \frac{c \cdot U_A}{2 \cdot |Z_{(1)A}|} = \frac{1,1 \cdot 22}{2 \cdot 1,652} = 7,324 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při dvoufázovém zemním zkratu v místě A:

$$I''_{kE2EA} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_A}{|Z_{(1)A} + 2 \cdot Z_{(0)A}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 22}{|1,652 + 2 \cdot 2,899|} = 5,626 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu v místě A:

$$I''_{k1A} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_A}{|2 \cdot Z_{(1)A} + Z_{(0)A}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 22}{|2 \cdot 1,652 + 2,899|} = 6,757 \text{ kA}$$

4.4.2 Zkrat v místě B

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu v místě B:

$$I''_{kB} = \frac{c \cdot U_B}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)B}|} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 15,94} = 4,383 \text{ kA}$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu v místě B:

$$I''_{k2B} = \frac{c \cdot U_B}{2 \cdot |Z_{(1)B}|} = \frac{1,1 \cdot 110}{2 \cdot 15,94} = 3,795 \text{ kA}$$

5 Závěr

Tato bakalářská práce byla zaměřena na popis postupu při výpočtu zkratových proudů v trojfázových soustavách včetně znázornění na praktické úloze. Úvod práce se zaměřil na vysvětlení základních pojmů, zejména rozlišení jednotlivých typů zkratových proudů, dále objasnění vzniku zkratu a jeho účinků, druhy zkratových poruch a v neposlední řadě určení zastoupení souměrných složek při výpočtu rozličných druhů zkratu.

Navazující kapitola patří metodice výpočtu zkratových proudů podle normy ČSN EN 60909. Tato jednotná evropská norma nahrazuje původní národní normy ČSN 33 3020 a ČSN 33 3022 a zavádí standardizovaný postup výpočtu zkratových proudů za pomoci metody ekvivalentního napěťového zdroje. Tato kapitola rozvádí vztahy a pravidla pro stanovení zkratových impedancí elektrických zařízení, potažmo zkratových proudů, jež jsou potřeba pro dimenzování elektrických zařízení či nastavování ochran.

Na příkladu byl znázorněn výpočet maximálních zkratových proudů. Podle nejvyšší z vypočtených hodnot počátečních souměrných rázových zkratových proudů je třeba dimenzovat elektrická zařízení v soustavě. V obou částech praktického příkladu bylo prokázáno, že největší je počáteční souměrný rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu.

Pokud zařízení není pro tuto hodnotu zkratově odolné, při průchodu zkratového proudu může dojít k jeho poškození až destrukci, načež i rozsáhlým ekonomickým škodám. V zájmu provozovatele soustavy je tedy provést důkladný výpočet zkratových proudů a zkratových výkonů. Přesnost výpočtu pomocí postupů popsaných v této práci je dostatečná i v praxi. Pro výpočet zkratových proudů případně lze využít také profesionálních počítačových aplikací pro modelování sítí, vhodných pro rozsáhlé sítě.

Nepříznivý vliv na elektrická zařízení v soustavě mají i další druhy zkratových proudů, které byly popsány v teoretické části této práce. Praktický výpočet hodnot těchto zkratových proudů vychází z vypočtených počátečních souměrných rázových zkratových proudů, avšak přesahuje stanovený rámec této práce.

Seznam použité literatury

1. TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 1. vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
2. ČSN EN 60909-0. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. Praha : Český normalizační institut, 2002.
3. HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika II. Zkraty, přepětí, stabilita, průmyslová energetika*. 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 80-707-8195-5.
4. VOKÁL, Josef. Výpočty zkratů v technické praxi. *Powerwiki*. [Online] [Citace: 28. Leden 2014.] http://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkraty_%20prednaska_textFEL.pdf.